This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

A 756,617 DUPL

Engin.
TK
1145
.C53

509.-

PRATIQUE INDUSTRIELLE

DES

COURANTS ALTERNATIFS

COURANTS MONOPHASES

PRATIQUE INDUSTRIELLE

DES

COURANTS ALTERNATIFS

COURANTS MONOPHASÉS

PAR

G. CHEVRIER,
Ingénieur à l'Usine centrale du Secteur électrique de la Rive gauche de Paris.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1900

(Tous droits réservés.)

ENGIN. LIBRARY

TK
1145
.C53

PRÉFACE

L'objet de cet ouvrage est de présenter, sous une forme que l'auteur s'est efforcé de rendre aussi élémentaire et aussi explicite que possible, l'ensemble des notions auxquelles se rattachent la production et l'utilisation des courants alternatifs.

Il s'adresse plus particulièrement aux ingénieurs et aux électriciens qui se trouveraient amenés à se spécialiser dans cette branche de l'industrie électrique, sans avoir eu précédemment l'occasion de faire une étude approfondie d'un ordre de phénomènes très différents de ceux auxquels a pu les habituer la pratique des courants continus.

Partant d'ailleurs de ce principe que les praticiens n'ont en général que peu de temps à consacrer à une étude de ce genre, l'auteur a éliminé toute question ne se rattachant pas immédiatement au but poursuivi, lequel consiste seulement à mettre en lumière l'ensemble des propriétés caractéristiques dont dépendent les effets que l'on voit se produire au cours de la pratique des courants alternatifs.

C'est ainsi que les calculs et conditions d'établissement des machines : génératrices, réceptrices ou transformateurs, ont été écartés pour laisser place

374071

aux seules *conditions de fonctionnement* pratiques de ces appareils, considérés comme des outils dont il s'agit, pour le cas spécial qui nous occupe, de posséder à fond le maniement, sans que l'on ait à les établir.

De même, toute description des divers types en usage a été jugée superflue, étant donné que la catégorie spéciale des lecteurs auxquels s'adresse l'ouvrage est, du fait de ses occupations, à même de se renseigner exactement sur la nature du matériel spécial qui lui est confié.

L'auteur doit ses remerciements les plus sincères à MM. Guilbert et Blondin pour l'extrême obligeance avec laquelle ces Messieurs ont bien voulu lui fournir de très précieuses indications au cours de la rédaction de cet ouvrage.

G. Chevrier.

Issy, 28 août 1899.

PRATIQUE INDUSTRIELLE

DES

COURANTS ALTERNATIFS

COURANTS MONOPHASÉS

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES

Génération du courant ; sa variation en fonction du temps : loi sinusoïdale. — Rapports de phase : décalage. — Valeurs efficaces ; représentation graphique des fonctions sinusoïdales ; vecteurs ; calcul graphique. — Lois générales.

Génération des courants alternatifs. — 1. Lorsqu'un circuit limite un flux Φ, toute variation $d\Phi$ de ce flux dans le temps dt donne naissance dans le circuit à une force électromotrice de valeur instantanée :

$$E_t = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Si le flux varie périodiquement en fonction du temps, la fonction dérivée E_t sera elle-même périodique et de même période que Φ.

Les courants auxquels donne naissance, dans un circuit fermé, une semblable force électromotrice, sont dits courants alternatifs.

2. En pratique, on réalise la condition ci-dessus en faisant varier d'une manière périodique :

1° Soit la position du circuit par rapport aux lignes de force du champ ;

2° Soit l'intensité du champ, la position du circuit restant invariable ;

3° Soit enfin la réluctance du circuit magnétique siège du flux inducteur.

Dans le premier cas, le circuit se déplace dans un champ magnétique constitué de telle sorte que le flux intercepté varie d'une manière continue lorsque le circuit passe d'une position à une autre, et que ce flux repasse périodiquement par les mêmes valeurs.

Prenons pour exemple la disposition indiquée (fig. 1).

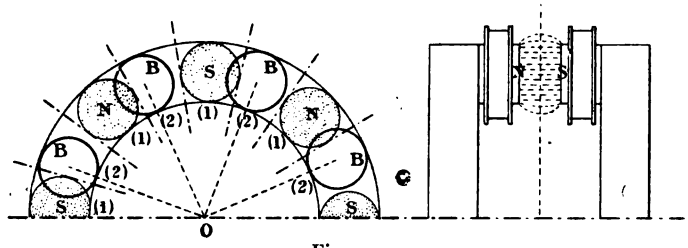

Fig. 1.

Deux séries de pôles, distribués symétriquement sur deux flasques circulaires, sont disposés de telle sorte que le flux magnétique vienne se fermer à travers l'entrefer NS ; des bobines B en nombre égal à celui des pôles tournent autour du centre O de manière à occuper successivement les positions 1, 2, 1, 2...

On voit que l'espace dans lequel elles se déplacent est divisé en deux séries de régions telles que les unes (1) localisent les lignes de force, tandis que les autres (2) en sont plus ou moins totalement dépourvues. Le circuit mobile limitera donc un flux qui, nul en (2), devient maximum (en valeur absolue), en (1), et repasse périodiquement par ces deux valeurs extrêmes. On arriverait évidemment au même résultat en déplaçant le champ

inducteur et en laissant fixes les bobines induites B.

Le second mode exige, pour la production du champ d'intensité périodique, l'emploi d'une force magnétomotrice également périodique qui ne peut être fournie que par un bobinage traversé par un courant alternatif de même période que celui qu'il s'agit d'obtenir.

Sur un même noyau en fer (fig. 2) sont bobinés deux circuits distincts (1) et (2). Le premier est parcouru par le courant fourni par une source génératrice alternative. Ce courant engendre dans le circuit magnétique, constitué par le noyau, un flux périodique qui se ferme à travers les spires du second bobinage, lequel est par suite le siège d'une force électromotrice alternative de même nature que celle obtenue par le premier procédé.

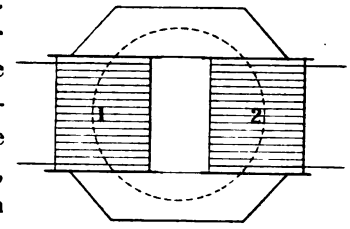

Fig. 2.

Dans les réalisations du troisième mode, les masses polaires et les circuits induits sont l'un et l'autre fixes comme dans le cas précédent, et les variations du flux inducteur sont obtenues au moyen d'une armature qui vient périodiquement ouvrir ou fermer, d'une manière plus ou moins complète, le circuit magnétique, faisant ainsi périodiquement varier sa réluctance, et par suite la valeur du flux dont il est le siège.

Une disposition de ce genre est indiquée figure 3.

Le circuit inducteur, alimenté par le courant continu d'une dynamo dite *excitatrice*, et le circuit induit sont bobinés sur deux épanouissements consécutifs de la même carcasse en fer constituant le circuit magnétique complété par l'armature A. Chaque position de cette armature, dans sa rotation autour du point O, détermine une valeur de l'entrefer correspondant à un nombre N de

lignes de force traversant le circuit magnétique. Le rapport $\frac{dN}{dt}$ donne à chaque instant la valeur de la force électromotrice induite dans chaque spire.

3. Les seuls modes de génération proprement dite

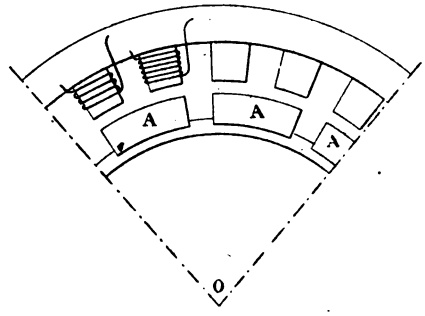

Fig. 3.

de l'énergie électrique sont le premier et le troisième. La forme initiale de l'énergie est, en effet, dans l'un et l'autre de ces deux cas le travail mécanique nécessaire pour effectuer dans le champ le déplacement, soit d'un circuit, soit d'une armature soumis à des efforts résistants d'intensités croissant en proportion de l'énergie demandée à la machine sous forme de courant électrique. Il y a donc là transformation de travail mécanique en énergie électrique.

Dans le second mode, la forme initiale de l'énergie est déjà l'électricité, et la transformation ne porte que sur les valeurs respectives des facteurs E et I dans l'un et l'autre circuit. En désignant par W_1 l'énergie cédée par la source au circuit inducteur ou *primaire*, par W_2 l'énergie recueillie dans le circuit extérieur alimenté par l'induit, ou *secondaire*, on doit avoir, en vertu du principe de la conservation de l'énergie :

$$W_2 = \rho W_1$$

ρ désignant le coefficient de rendement de l'appareil. On peut d'ailleurs écrire :

$$W_2 = e_2 i_2$$
$$W_1 = e_1 i_1$$

les symboles e, i désignant les facteurs de l'énergie électrique sous forme alternative tels que nous les définirons plus loin (force électromotrice efficace, intensité efficace *wattée*), et la relation :

$$e_2 i_2 = \rho e_1 i_1$$

montre que la force électromotrice e_2 aux bornes du secondaire peut avoir, par rapport à e_1, force électromotrice primaire, une valeur quelconque, d'où le nom de *transformateurs* de force électromotrice, ou plus simplement de *transformateurs*, donné à ces appareils ; le nom de *générateurs de courants alternatifs*, ou d'*alternateurs*, étant réservé aux appareils des deux autres classes.

4. Quels que soient d'ailleurs la nature et le mode de la transformation conduisant à obtenir aux bornes du circuit d'utilisation une force électromotrice alternative, l'agent primordial est toujours le flux dont les variations produisent cette force électromotrice. Cette notion est donc celle qui, logiquement, doit servir de base dans l'étude des générateurs ou des transformateurs alternatifs.

Dans le cas le plus général, la production de ce flux nécessite une dépense d'énergie qui ne passe pas à la transformation *sous forme utilisable*. En principe, et abstraction faite des conditions variables du circuit d'utilisation nécessitant, ainsi que nous le verrons plus loin, un réglage spécial de l'*excitation*, les générateurs proprement dits pourraient comporter l'emploi d'aimants permanents (machines de Méritens), ne nécessitant, une fois établis, aucune dépense d'énergie. Mais, dans la pres-

que totalité des applications industrielles, c'est à une source extérieure de courant continu que l'on emprunte la force magnétomotrice produisant le flux. Ce courant, que l'on appelle *courant d'excitation* ou *d'aimantation*, ne servant qu'à maintenir l'aimantation des pièces polaires qui se comportent dès lors comme des aimants permanents, reste en dehors de la transformation proprement dite, laquelle porte uniquement sur le travail mécanique nécessaire pour mouvoir les circuits induits dans le champ des aimants, ou inversement. Son énergie se retrouve intégralement sous forme de chaleur (effet Joule), dans le bobinage inducteur.

Il en est de même pour les transformateurs, à cette différence près que, dans ce cas, l'énergie *transformée*, c'est-à-dire se retrouvant dans le circuit secondaire ou d'utilisation, et l'énergie dépensée dans l'excitation, sous forme de chaleur, ont une source commune, qui est le courant primaire. On peut, à ce point de vue, considérer que l'intensité totale du courant primaire est à chaque instant la somme de l'intensité d'excitation et de l'intensité produisant le travail utilisable dans le circuit extérieur : la première ayant une valeur indépendante des variations de ce travail, tandis que la seconde lui reste proportionnelle.

Détermination de la fonction $\Phi = f(t)$; ***hypothèse fondamentale.*** — 5. La force électromotrice aux bornes d'un circuit de courants alternatifs, et l'intensité du courant qui le traverse sont des fonctions du temps dont la forme est déterminée par celle du flux générateur $\Phi = f(t)$. Or, la forme de la fonction $f(t)$ varie d'un alternateur à l'autre : elle dépend de conditions complexes, et notamment de la disposition donnée aux masses polaires et aux circuits induits.

On sait toutefois que, dans tous les cas, la variation

est périodique, car il suffit, pour qu'il en soit ainsi, que le mouvement soit uniforme et la répartition du flux inducteur symétrique, conditions pratiquement réalisées d'une manière très suffisante.

L'hypothèse fondamentale consiste à admettre que la variation périodique suit la loi sinusoïdale, qui est la plus simple (1).

On peut d'ailleurs, dans chaque cas particulier, relever au moyen d'appareils nommés *oscillographes* la courbe des variations, soit de la force électromotrice d'un générateur, soit de l'intensité du courant dans un circuit donné. L'examen de ces courbes, relatives à des appareils de constructions différentes, montre que si leur diversité ne permet pas en toute rigueur de leur attribuer une loi uniforme de variations, la loi sinusoïdale est toutefois celle qui cadre le mieux, comme moyenne, avec l'ensemble des résultats.

Au reste, les écarts entre les prévisions basées sur cette hypothèse et les résultats obtenus dans la pratique ne portent que sur l'exactitude des résultats numériques, et non sur la nature et le sens de ces phénomènes, ce qui justifie son emploi dans le cas d'une étude générale ayant pour but de préciser le sens des actions plutôt que leur grandeur exacte.

6. Nous admettrons donc que la loi de variation du flux Φ en fonction du temps t est donnée par le premier terme de la série de Fourier :

$$\Phi = \Phi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

---

(1) Fourier a démontré que toute fonction périodique pouvait s'écrire :

$$y = y_0 \sin \frac{2\pi}{T} t + y_1 \sin 2 \frac{2\pi}{T} (t - \varphi_1) + \ldots$$

L'hypothèse ci-dessus consiste donc à réduire la fonction à son premier terme.

Φ_0 étant la valeur maxima de la fonction Φ, correspondant à $\sin \frac{2\pi}{T} t = 1$, et T la durée de la *période*, pendant laquelle la fonction passe par toutes ses valeurs positives et négatives.

Force électromotrice. Intensité de courant. — 7. L'équation de la force électromotrice induite sera donc :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{2\pi}{T}\Phi_0 \cos\frac{2\pi}{T} t$$

soit, en désignant par E_0 sa valeur maxima :

$$E = -E_0 \cos\frac{2\pi}{T} t = E_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{\pi}{2}\right)$$

La force électromotrice suivra donc également la loi sinusoïdale, si cette loi est admise pour le flux générateur.

8. Il en est de même pour l'intensité du courant dans un circuit quelconque. Soient, en effet, E_t, E_t', E_t''... les valeurs au même instant t des forces électromotrices agissant dans le circuit considéré. La valeur au même instant I_t de l'intensité sera :

$$I_t = \frac{1}{R}\left(E_t + E_t' + E_t'' + \ldots\right)$$

et la fonction I_t, somme de fonctions sinusoïdales, sera elle-même une sinusoïde.

Fréquence ; phase, différence de phase ou décalage. — 9. Soit :

$$(1) \qquad y = y_0 \sin\frac{2\pi}{T} t$$

l'équation d'une fonction sinusoïdale quelconque : flux, force électromotrice ou intensité du courant. T étant la durée d'une période, le nombre de périodes par unité de temps, c'est-à-dire par seconde, sera égal à $\frac{1}{T} = F$: c'est ce nombre que l'on appelle la fréquence relative à la fonction considérée, dont la valeur y change par suite de signe 2F fois par seconde.

Décrivons (fig. 4) une circonférence de rayon OA égal

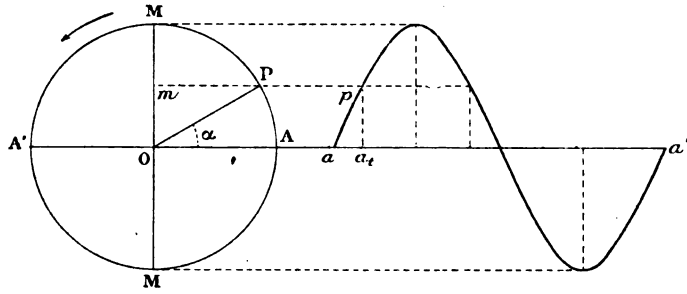

Fig. 4.

à l'amplitude ou valeur maxima y_0 de la fonction, et, sur le diamètre OA prolongé, portons une longueur $aa' = T$.

Supposons que le point P décrive dans un temps T, à partir du point A pour origine, dans le sens indiqué par la flèche, et d'un mouvement uniforme, la circonférence O. Si l'on porte les temps t en abscisses sur l'axe aa' à partir du point a, à chaque position du point P, définie par la valeur de l'angle α, correspondra un point p de la sinusoïde ayant pour ordonnée :

$$y = Om = OP \sin \alpha = y_0 \sin \alpha$$

On a donc :

$$\alpha = \frac{2\pi}{T} t = \omega t$$

ω désignant la vitesse angulaire du point P, et la valeur

de l'angle α à un instant quelconque t définit ce que l'on appelle la *phase* de la fonction y.

Considérons une autre fonction y' de même période, mais telle qu'au même instant t l'arc décrit par le point P′ soit α' différent de α (fig. 5) on dira alors que les deux

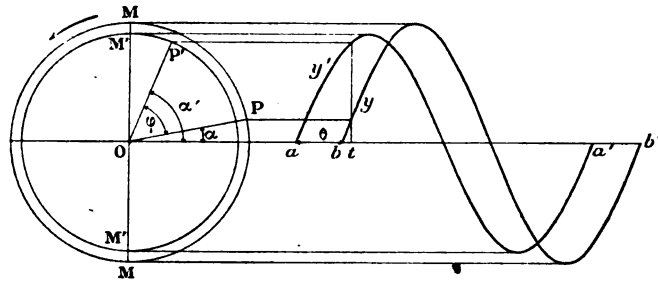

Fig. 5.

fonctions sont *décalées* l'une par rapport à l'autre, leur décalage étant égal à la différence $\alpha' - \alpha$ de leurs phases respectives ; et l'on appelle *angle de décalage* l'angle $\varphi = \alpha' - \alpha$.

Les arcs étant comptés à partir du point A dans le sens inverse de celui du mouvement des aiguilles d'une montre, si l'on a $\alpha' > \alpha$, on dira que la fonction y' est *en avance de phase*, ou *décalée en avant* par rapport à y. Son équation pourra s'écrire :

$$y' = y_0' \sin(\alpha + \varphi).$$

Si, au contraire, on a $\alpha' < \alpha$, y' sera dite en *retard de phase*, ou décalée en arrière par rapport à y, et son équation s'écrira :

$$y' = y_0' \sin(\alpha - \varphi)$$

φ désignant dans les deux cas un arc positif, c'est-à-dire compté dans le sens indiqué précédemment.

Sous la forme (1), les équations des deux sinusoïdes seront respectivement :

$$y = y_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

et :

$$y' = y_0' \sin \frac{2\pi}{T} (t + \theta)$$

si y' est en avance de phase sur y, ou :

$$y' = y_0' \sin \frac{2\pi}{T} (t - \theta)$$

dans le cas du retard, θ désignant alors l'intervalle qui sépare les deux instants t_0 et t_0' où les fonctions passent respectivement par leur o origine, ou encore le temps nécessaire pour décrire l'arc φ égal à la différence des phases.

Prenons pour exemple les équations des paragraphes 6 et 7 :

$$\Phi = \Phi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t = \Phi_0 \sin \alpha$$

$$E = E_0 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{\pi}{2}\right) = E_0 \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)$$

Si l'on trace (fig. 6) les deux circonférences ayant le point O pour centre commun, et pour rayons respectifs $OP = \Phi_0$, $OQ = E_0$, à chaque valeur α de l'angle décrit par le rayon OP à partir de la direction origine OA correspondra un angle $\alpha - \frac{\pi}{2}$ décrit par le rayon OQ à partir de la même origine, c'est-à-dire que le premier sera en avance sur le second d'un arc égal à $\frac{\pi}{2}$.

On dira donc que la force électromotrice E est décalée

de 90° en arrière du flux Φ ; ou encore — puisque le temps nécessaire pour décrire l'arc $\frac{\pi}{2}$ est égal à 1/4 de période — que E est en retard sur Φ de 1/4 de période.

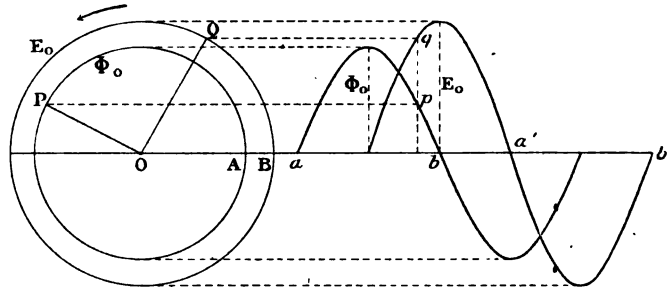

Fig. 6.

Dans ces conditions, E sera égale à 0 aux instants où Φ passera par un maximum, et réciproquement.

10. Cherchons, dans le cas général d'un décalage φ

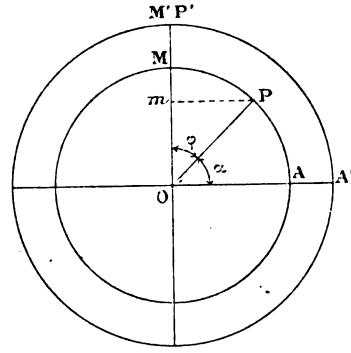

Fig. 7.

quelconque entre deux fonctions, quelle est la valeur de l'une d'elles à l'instant où l'autre passe par un maximum.

Nous avons vu (§ 9, fig. 4), qu'à un instant quelconque t, l'ordonnée de la sinusoïde est égale à la projection Om du

rayon OP sur le diamètre vertical MM. Traçons (fig. 7) les circonférences de rayons OP $= y_0$, OP′ $= y'_0$ relatives aux deux fonctions :

$$y = y_0 \sin \alpha$$
$$y' = y'_0 \sin (\alpha + \varphi)$$

A l'instant où y' atteint sa valeur maxima y'_0, correspondant à $(\alpha + \varphi) = \frac{\pi}{2}$, OP′ coïncide avec OM′ et l'angle de OP avec OM est par suite l'angle φ. On a donc :

$$y = Om = y_0 \cos \varphi$$

donc :

Lorsque deux fonctions sont décalées d'un angle φ, à l'instant où l'une d'elles passe par son maximum, la valeur de la seconde est égale à son maximum multiplié par le cosinus de l'angle de décalage.

11. La notion du décalage est prédominante dans l'étude des courants alternatifs. Les facteurs Φ, E, I..., qui interviennent au cours d'une même étude, ont tous même périodicité T, qui est celle du flux générateur, mais ils diffèrent généralement de phases. Nous savons déjà que la force électromotrice induite est en retard de 1/4 de période sur le flux qui lui donne naissance ; de même, le courant produit dans un circuit donné par une force électromotrice génératrice présente, en général, par rapport à celle-ci, une différence de phase variable avec les conditions du circuit. Enfin, le courant donne à son tour naissance, dans le circuit, à des forces électromotrices de réaction : force électromotrice de self-induction, d'induction mutuelle, etc..., lesquelles sont encore décalées par rapport à lui, et par suite aussi par rapport à la force électromotrice et au flux générateurs.

Le décalage entre facteurs de même nature agissant

dans un circuit commun, soit électrique (forces électromotrices), soit magnétique (forces magnétomotrices), ayant pour effet immédiat, ainsi que nous l'avons vu au paragraphe précédent, de troubler la concordance des actions respectives, diminue de ce fait l'intensité de l'action totale. On peut comparer cet effet à ce qui se passe lorsque, dans une manœuvre de force, tirage ou levage, les efforts individuels ne sont pas rythmés de manière à produire au même instant leur maximum d'action. Il y a, dans ce cas ainsi que dans celui qui nous occupe, perte au point de vue de l'utilisation. Nous étudierons par la suite les autres conséquences du décalage.

Valeurs efficaces. Force électromotrice; intensité de courant. — 12. Le fait de toute application industrielle des courants alternatifs étant de mettre en jeu une certaine quantité d'énergie électrique, constante pour un état de régime donné, il importe de mettre en évidence les facteurs, constants pour cet état de régime, qui interviennent dans la mesure de cette énergie. Lorsqu'il s'agit de courants continus, ces facteurs sont les valeurs numériques de la force électromotrice aux bornes de l'appareil d'utilisation, et de l'intensité du courant qui le traverse ; mais, dans le cas actuel, ces valeurs numériques font, *a priori*, défaut, puisque la force électromotrice et l'intensité de courant oscillent perpétuellement de part et d'autre de la valeur o entre les deux limites correspondant au maximum positif et au maximum négatif. Elles n'en produisent pas moins un travail bien déterminé dans chaque cas, soit sous forme de chaleur, soit sous forme de travail mécanique, aussi bien que dans le cas des courants continus.

Considérons, par exemple, le cas d'une lampe à incandescence alimentée par un courant alternatif. Bien que l'intensité de ce courant passe périodiquement par o,

l'éclairage est pratiquement aussi fixe que s'il était dû à un courant continu, tout au moins dans les conditions industrielles de fréquence (au moins 40 périodes par seconde). Ceci tient à la persistance des impressions lumineuses sur la rétine, et aussi à ce fait que le refroidissement du filament n'étant pas instantané, sa température oscille, avec les variations périodiques du courant, entre deux valeurs relativement peu différentes.

Quoi qu'il en soit, il est impossible de distinguer, à vue, si une lampe à incandescence fonctionne sous courant continu ou alternatif; et l'on est ainsi conduit à admettre que, dans ce dernier cas, tout se passe comme si la force électromotrice aux bornes de la lampe, au lieu d'être variable, avait une valeur constante, qui serait dès lors celle de la force électromotrice continue produisant le même éclat.

Cette valeur constante se nomme *force électromotrice efficace*. La notion d'*intensité efficace* se conçoit de la même manière.

Plus généralement, considérons une résistance purement *ohmique*, c'est-à-dire *sans self-induction ni capacité*, en dérivation sur les bornes d'une force électromotrice alternative. La quantité d'énergie électrique transformée par unité de temps en chaleur dans la résistance peut toujours être considérée comme égale au produit d'une intensité constante I par la chute de potentiel RI correspondant à cette intensité et à la résistance R. Si Q est la quantité de chaleur produite au bout d'un temps θ, on aura donc :

$$Q = RI^2\theta$$

et on appellera valeur *efficace* de l'intensité la valeur I, telle que :

$$I^2 = \frac{Q}{R\theta}$$

La *force électromotrice efficace* aux bornes sera égale à la chute de potentiel :

$$E = RI.$$

Calcul et mesure des valeurs efficaces. — 13. En réalité, la quantité de chaleur Q est due, non à l'intensité constante I, purement fictive, mais à l'intensité variable :

$$i = I_0 \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

de telle sorte que l'on a :

$$Q = RI^2\theta = \int_0^\theta Ri^2 dt = \int_0^\theta RI_0^2 \sin^2 2\pi \frac{t}{T} dt$$

Prenons θ égal à une demi-période $\frac{T}{2}$:

$$RI^2 \frac{T}{2} = RI_0^2 \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2 \frac{2\pi}{T} t dt$$

$$= \frac{1}{2} RI_0^2 \int^{\frac{T}{2}} \left(1 - \cos 2 \frac{2\pi}{T} t\right) dt.$$

Intégrant, il vient :

$$RI^2 \frac{T}{2} = RI_0^2 \frac{T}{4}$$

Soit :

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Soit :

Intensité efficace $= \frac{1}{\sqrt{2}}$ de l'intensité maxima.

En partant de l'expression :

$$Q = \frac{E^2}{R} \theta$$

on trouverait de même :

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$$

Soit :

Force électromotrice efficace $= \frac{1}{\sqrt{2}}$ de la force électromotrice maxima.

14. Ces valeurs efficaces jouent donc, dans les applications des courants alternatifs, un rôle analogue (1) à celui des facteurs constants e, i d'un courant continu. Lorsque l'on parle d'un courant alternatif de 100 ampères, d'une force électromotrice alternative de 1 000 volts, il est toujours entendu que ces chiffres désignent les valeurs efficaces. On définit de même la puissance d'un générateur ou d'un récepteur quelconque par les valeurs efficaces de la force électromotrice et de l'intensité de courant correspondant aux conditions du régime prévu.

Toutefois, dans le cas général, la connaissance de ces deux facteurs ne suffit pas pour la détermination de la puissance produite ou absorbée au cours d'une application donnée. Ainsi que nous le verrons par la suite, un troisième facteur intervient, qui est le décalage relatif du courant et de la force électromotrice considérés.

Il existe, en outre, un certain nombre de cas où il y a lieu de considérer, non la valeur efficace, mais la valeur maxima de la fonction. Par exemple, s'il s'agit de prévoir un isolant capable de résister à une tension alternative donnée, c'est évidemment la valeur maxima de cette dernière qui doit intervenir dans les calculs. Il en est de même pour les actions physiologiques : c'est de la valeur maxima de la force électromotrice que dépend le plus ou moins de danger inhérent à son emploi. La valeur

(1) L'identité n'existe que dans le cas particulier où le décalage entre les facteurs est rigoureusement nul.

maxima est, d'après ce qui précède, égale au produit de la valeur efficace par $\sqrt{2} = 1,414$, soit presque une fois et demie cette valeur. Ainsi la tension réelle est de 1 414 volts, si la force électromotrice efficace ou nominale, puisque c'est toujours celle-ci que l'on prend comme indication, est de 1000 volts ; de 2828 volts, pour Eeff = 2 000^{v} ; et de 4 242 volts, pour Eeff = 3 000^{v}.

Mesure des valeurs efficaces. — 15. Un voltmètre Cardew, et en général tout appareil de fonctionnement basé sur une action thermique, fournira — ayant été étalonné sur un courant continu — la valeur efficace du facteur : force électromotrice ou intensité de courant, qu'il est appelé à mesurer.

L'organe essentiel est un fil métallique, tendu par l'action d'un ressort ou d'un contrepoids, aux bornes duquel agit une force électromotrice qui est, dans le cas du voltmètre, la force électromotrice qu'il s'agit de mesurer, ou une fraction déterminée de celle-ci, et, dans le cas de l'ampèremètre, la perte de charge RI dans une résistance connue. Le fil se trouve dès lors dans des conditions exactement analogues à celles du filament d'une lampe à incandescence ; il prend, comme celui-ci, une température que l'on peut considérer comme constante pour chaque état de régime défini par la valeur efficace de la chute de potentiel dont il est le siège ; et l'allongement correspondant à cette température permet, au moyen d'un tarage préalable, la connaissance de cette valeur efficace.

Un appareil de ce genre, voltmètre ou ampèremètre, pourra donc indifféremment, et sans modification d'échelle, servir à la mesure de courants continus ou alternatifs, quelles que soient d'ailleurs la loi de variation et la fréquence de ces derniers. Remarquons, en effet, que la définition de la valeur efficace, basée uniquement sur

l'effet produit, est de ce fait indépendante de toute hypothèse *a priori* sur la loi de variation de la grandeur à mesurer ; il n'en est pas de même de la valeur $\sqrt{2}$ admise pour le rapport :

$$\frac{E\ max}{E\ eff}$$

laquelle repose sur l'hypothèse de la loi sinusoïdale.

16. Dans les appareils thermiques, le couple produisant la déviation de l'aiguille est proportionnel à l'échauffement produit, c'est-à-dire au carré de l'intensité efficace du courant qui traverse l'appareil. Il est évident que tout appareil dans lequel le couple directeur suivra la même loi pourra convenir pour la mesure des valeurs efficaces, quel que soit d'ailleurs le principe de son fonctionnement. C'est, en particulier, le cas des électrodynamomètres du type Siemens, dans lequel le couple directeur est le résultat de l'action exercée, sur un courant, par le champ engendré par le même courant. L'action résultante a, comme on sait, pour valeur :

$$P = kI^2.$$

D'une manière générale, le couple directeur d'un circuit mobile dans un champ a pour expression :

$$P = \Phi I,$$

Φ désignant la composante du flux normale au plan du circuit, et I l'intensité du courant qui le traverse. La loi précédente se trouvera remplie si le flux a son origine dans le courant lui-même, car son expression sera dès lors de la forme :

$$\Phi = aI,$$

a désignant une constante, d'où :

$$P = aI \times I = aI^2.$$

Lorsqu'un appareil basé sur ce principe est parcouru par un courant alternatif, le couple directeur déterminant la position de l'équipage mobile peut être considéré comme constant au même titre que l'on considère comme constante la température déterminant l'éclat d'une lampe à incandescence ou l'allongement du fil d'un voltmètre Cardew. Ceci résulte de ce que l'inertie de l'équipage ne lui permettant pas de prendre le mouvement de très courte période que tend à lui communiquer le couple périodiquement variable, l'immobilise dans un état d'équilibre analogue à l'état physique du filament, défini par sa longueur et son éclat lumineux. Cette valeur constante du couple directeur pour une intensité donnée mesure cette intensité à un facteur constant près, qui dépend de la construction de l'appareil.

17. Dans la plupart des appareils à lecture directe, voltmètre ou ampèremètre, on remplace le circuit mobile par une pièce de fer doux dont l'induction magnétique suit la variation périodique du courant inducteur. Le rapport entre l'intensité qu'il s'agit de mesurer et la valeur du couple directeur déterminant la position de la pièce mobile dans le champ est alors variable avec cette position, et l'appareil doit être gradué par comparaison avec un étalon, comme pour le cas d'ailleurs des appareils thermiques. Mais il existe, entre ces deux catégories d'appareils, cette différence fondamentale que, tandis que l'étalonnage des voltmètres thermiques est indépendant de la nature du courant, celui du voltmètre électromagnétique varie suivant que le courant est continu ou périodique, et, dans ce dernier cas, avec sa fréquence. Un voltmètre électromagnétique ne peut donc être employé que dans des conditions de fréquence identiques à celles du courant ayant servi à la détermination de sa graduation.

18. Mais, dans ce cas comme dans le précédent, le

couple directeur a son origine dans le courant seul, lequel produit l'aimantation du fer et par suite le flux Φ. Il cesse d'en être ainsi lorsque l'appareil comporte un aimant permanent comme source du flux. Ce dernier a dès lors une valeur constante en grandeur, direction et sens : de telle sorte que le couple directeur est proportionnel à l'intensité du courant, et non plus au carré de cette intensité. Il en résulte qu'il change de sens à chaque demi-période. L'aiguille de l'appareil sera donc sollicitée à se mouvoir de part et d'autre du *o* de la graduation ; et si l'inertie est suffisante pour la maintenir à une position fixe, cette position correspondra au *o*, quelle que soit d'ailleurs la valeur efficace de la grandeur à mesurer.

19. Les appareils à aimant permanent ne peuvent donc pas servir à la mesure des valeurs efficaces. Mais supposons que l'on arrive à réduire assez l'inertie de l'équipage mobile pour que sa période d'oscillation propre soit — contrairement à ce qui a lieu dans les galvanomètres ordinaires — très courte par rapport à la période du courant ; admettons d'une manière générale que toute cause de retard ou de trouble quelconque soit éliminée, de telle sorte que le cadre mobile prenne instantanément dans le champ la position d'équilibre qui correspond à chaque valeur de $I = I_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$: on aura dès lors un appareil donnant à chaque instant et d'une manière continue la valeur variable de la fonction I.

Il est évident que la variation est trop rapide pour que l'on puisse apprécier, à un instant quelconque t, la valeur correspondante I_t à la manière ordinaire. Mais la représentation simultanée de l'ensemble de ces valeurs, c'est-à-dire la courbe figurative de la fonction I, peut être obtenue par un dispositif optique, mettant sous les yeux cette courbe et permettant par suite de la photographier.

Les appareils construits dans ce but se nomment *oscil-*

lographes ; le premier réalisé pratiquement d'une manière parfaite est celui de M. Blondel.

Ils fournissent, concurremment avec d'autres méthodes (1), la forme de la courbe de la fonction F (t) relative à la force électromotrice ou à l'intensité de courant de chaque type de générateur alternatif.

La connaissance de cette courbe, dans chaque cas particulier de construction, est évidemment du plus haut intérêt, car elle permet de contrôler dans quelle mesure l'hypothèse de la loi sinusoïdale est justifiée, et au besoin de prévoir les modifications qu'il peut y avoir lieu d'apporter au type de générateur considéré pour rendre son fonctionnement plus voisin des conditions théoriques.

Flux efficace. — 20. Cette notion, et celles qui s'y rattachent, d'intensité de champ et d'induction magnétique efficaces, peuvent se déduire expérimentalement de ce qui a été dit concernant la position d'équilibre permanent que prend dans un champ alternatif un équipage de galvanomètre traversé par le courant générateur du champ, lorsque son inertie est suffisamment grande.

Considérons par exemple le cadre mobile d'un électrodynamomètre Siemens. Le couple directeur déterminant sa position dans le champ est le même, que le courant soit continu ou alternatif, pourvu que l'intensité continue ait même valeur que l'intensité alternative efficace. Ce couple étant mesuré dans l'un et l'autre cas par le produit ΦI d'un flux par une intensité de courant, le facteur Φ mesurera, dans le cas du courant alternatif, la valeur efficace du flux variable.

On peut encore définir le flux efficace comme étant le

(1) Voir, pour l'étude détaillée de cette question, le *Cours d'électricité industrielle* (4e année) professé par M. PIONCHON à la Faculté des sciences de Grenoble.

flux constant en grandeur qui, dans un circuit magnétique donné, correspond à une valeur donnée des ampères-tours efficaces.

De même, un noyau de fer doux placé dans un champ alternatif prendra une induction magnétique efficace déterminée par la valeur efficace du flux qui le traverse :

$$\mathfrak{B}_{eff} = \frac{\Phi_{eff}}{S}.$$

Les efforts d'attraction s'exprimeront de la même manière en fonction de l'induction efficace.

Calculs portant sur les valeurs efficaces. — 21. Les relations établies, dans le cas de courants constants, entre les divers facteurs : forces électromotrices, intensités, flux, etc., ne s'appliquent évidemment, pour des courants périodiques, qu'aux valeurs *simultanées* de ces facteurs.

Il en résulte qu'on ne pourra pas, dans le cas général, écrire ces relations entre des valeurs efficaces : car celles-ci ne sont — au facteur constant $\sqrt{2}$ près — autres que les valeurs maxima des facteurs considérés, lesquelles ne sauraient être simultanées que dans le cas particulier où ces facteurs coïncideraient en phase.

22. Prenons par exemple le cas de deux forces électromotrices alternatives e, e' agissant dans un même circuit. La force électromotrice V qui produit le courant dans le circuit sera, à chaque instant t, égale à la somme algébrique de ces deux forces électromotrices, soit :

$$V_t = e_t + e'_t.$$

Considérons l'instant t_0 où V prend sa valeur maxima V_0 ; le même instant détermine pour e, e' des valeurs e_{t0}, e'_{t0} qui, s'il existe une différence de phase entre ces forces

électromotrices, seront différentes des valeurs maxima E_0 E'_0. On aura donc :

$$V_0 = e_{t_0} + e'_{t_0} < E_0 + E_0',$$

soit encore, entre les valeurs efficaces :

$$V < E + E'$$

Ainsi, dès qu'il existe un décalage entre les forces électromotrices en circuit, la somme algébrique de leurs valeurs efficaces n'est pas égale à la valeur efficace de la différence de potentiel agissante, ainsi que cela aurait lieu dans le cas des courants continus.

Mais, d'après la loi énoncée au paragraphe 10, si φ et φ' sont les angles de décalage de e et de e' par rapport à V, on aura :

$$e_{t_0} = E_0 \cos \varphi$$
$$e'_{t_0} = E_0' \cos \varphi'$$

d'où :

$$V_0 = E_0 \cos \varphi + E_0' \cos \varphi'$$

et par suite aussi :

$$V = E \cos \varphi + E' \cos \varphi'$$

soit, pour le cas général d'un nombre quelconque de force électromotrices agissant dans le circuit considéré :

$$V = \Sigma E \cos \varphi.$$

23. *Intensité du courant.* — Si R est la résistance du circuit, l'intensité du courant due à l'ensemble des forces électromotrices agissantes aura pour expression :

$$I = \frac{E \cos \varphi + E' \cos \varphi' + E'' \cos \varphi'' + \ldots}{R} = \Sigma \frac{E \cos \varphi}{R}$$

φ, φ', φ''...., désignant les angles de décalage des forces électromotrices par rapport au courant.

Circuits dérivés. — Soient i, i', i'',... les intensités efficaces des courants dans n circuits dérivés, I l'intensité efficace dans le circuit principal alimentant les n dérivations, et φ, φ', φ'',..., les angles de décalage de ce dernier courant par rapport à chacun des n autres. La loi du paragraphe 10 nous donnera, dans ce cas comme dans celui des sommes de force électromotrices :

$$I = i \cos \varphi + i' \cos \varphi' + i'' \cos \varphi'' + \ldots = \Sigma\, i \cos \varphi.$$

24. *Puissance.* — Nous avons trouvé précédemment (§ 13), entre l'intensité continue I et l'intensité alternative, de valeur maxima I_0 produisant un travail égal, la relation :

$$RI^2 \frac{T}{2} = RI_0^2 \frac{T}{4}$$

Le produit RI^2 mesure la puissance développée W, et l'on a, d'après ce qui précède :

$$I_0 = \frac{E_0 \cos \varphi}{R}$$

d'où

$$W \frac{T}{2} = E_0 I_0 \cos \varphi \times \frac{T}{4}$$

$$W = \frac{E_0 I_0}{2} \cos \varphi = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} \cos \varphi = EI \cos \varphi.$$

La puissance est donc égale au produit des valeurs efficaces de la force électromotrice et de l'intensité de courant, multiplié par le cosinus de leur angle de décalage.

25. En définitive, on voit que les valeurs efficaces ne

peuvent entrer dans les relations exprimant les lois fondamentales des courants continus qu'à la condition d'être affectées d'un coefficient définissant, par rapport à une origine commune, la phase de la fonction sinusoïdale correspondante.

Ceci revient à considérer que chacun des facteurs qui interviennent dans une étude donnée doit être défini, non seulement en grandeur numérique par sa valeur efficace, mais encore en *position*, par l'angle φ mesurant son calage par rapport aux autres éléments du problème. Si l'on convient de compter cet angle de o à 2π, toujours dans le même sens (inverse du mouvement des aiguilles d'une montre), il déterminera le facteur considéré en position et en sens.

On voit donc que ces facteurs sont fonctions des mêmes éléments que les forces, en Mécanique ; ils pourront,

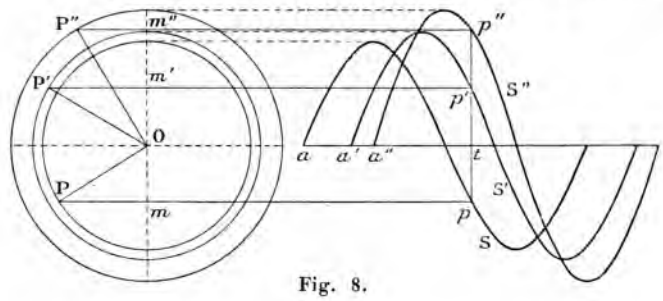

Fig. 8.

comme celles-ci, être représentés graphiquement par des *vecteurs*, ou segments de droites, de longueur égale à la valeur efficace, et de direction et sens déterminés par la valeur de l'angle de calage relativement à une direction origine quelconque.

26. Il est facile de vérifier que, pour une fréquence donnée, toute fonction sinusoïdale est complètement déterminée par le vecteur correspondant. Soit S (fig. 8) la courbe figurative d'une fonction sinusoïdale donnée.

Projetons un point p de cette courbe en P sur la circonférence de rayon égal à son ordonnée maxima S_0 ; si le point P décrit la circonférence dans le temps T de la période, la projection Om de OP sur le diamètre vertical sera à chaque instant égale en grandeur et en signe à la valeur au même instant de la fonction sinusoïdale considérée.

Soient S′, S″,...., les courbes relatives à d'autres fonctions sinusoïdales présentant, par rapport à la première, des avances ou des retards de phase mesurés, sur l'axe des temps, par les distances aa', aa''... de leurs origines respectives. Considérons, à un instant t, les valeurs simultanées tp, tp', tp''... des diverses fonctions, et projetons les points p, p', p''... en P, P′, P″... sur les circonférences correspondantes. Les angles POP′, POP″, P′OP″,..., définissent les calages relatifs des fonctions considérées. Comme d'ailleurs la fréquence est la même pour toutes les fonctions intervenant au cours d'une même étude, les points P, P′, P″... décrivent leurs circonférences respectives avec des vitesses angulaires égales ; le mouvement relatif des droites OP, OP′, OP″... est nul, d'où il résulte que l'on peut considérer la figure comme fixe dans le plan.

Ainsi, chaque droite OP détermine la sinusoïde correspondante en *grandeur :* car elle permet, en faisant décrire au point P la circonférence, de la tracer point par point; et en *position relative*, ou phase, par l'angle, tel que P′OP, qui définit son calage par rapport aux autres sinusoïdes du problème.

Un simple changement d'échelle, dans le rapport de 1 à $\frac{1}{\sqrt{2}}$, fera que la longueur OP représente, au lieu de la valeur maxima, la valeur efficace.

27. Dans les calculs, la notion de vecteur se substitue à celle de valeur numérique, les relations algébri-

ques entre les facteurs constants du courant continu se traduisant par des relations géométriques, ou équipollences, entre les valeurs efficaces des facteurs du courant alternatif.

Ainsi, dans l'exemple du paragraphe 22, la force électromotrice V produisant le courant dans le circuit sera la *somme géométrique*, ou résultante, telle qu'on la définit en Mécanique, des forces électromotrices agissant dans le circuit.

Soient OE, OE′, OE″... (fig. 9 et 10) les vecteurs défi-

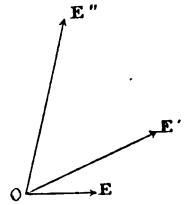

Fig. 9.

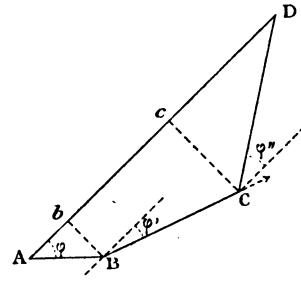

Fig. 10.

nissant ces forces électromotrices. Portant bout à bout AB, BC, CD... respectivement égales et parallèles à OE, OE′, OE″..., et joignant AD, cette dernière droite représentera en grandeur et direction la somme géométrique des forces électromotrices, E, E′, E″...; ce sera donc le vecteur définisssant V.

On voit en effet que, si l'on projette sur AD les points B, C, on a :

$$AD = Ab + bc + cD$$

et comme :

$$Ab = E \cos \varphi$$
$$bc = E' \cos \varphi'$$
$$cD = E'' \cos \varphi''$$

on retrouve la relation établie précédemment :

$$AD = E \cos \varphi + E' \cos \varphi' + E'' \cos \varphi'' = V.$$

Lois générales. — 28. Toute fonction sinusoïdale étant définie par un vecteur déterminé, en longueur par la valeur maxima ou efficace de la fonction, et en position par sa phase relative, on déduit de la propriété fondamentale des vecteurs la loi suivante :

La somme de plusieurs fonctions sinusoïdales de même période est, en grandeur et en phase, la fonction sinusoïdale définie par le vecteur obtenu en composant les vecteurs relatifs à ces fonctions ; ce vecteur étant, comme on sait, la ligne de fermeture du polygone ayant pour côtés les droites équipollentes aux vecteurs figuratifs des fonctions considérées.

En particulier, la valeur efficace de cette somme sera donnée par la longueur du vecteur résultant, si les longueurs des vecteurs composants ont été prises égales aux valeurs efficaces des fonctions correspondantes.

29. Cette loi fondamentale s'applique notamment, dans le cas actuel :

1° Aux forces électromotrices diverses agissant dans un même circuit ;

2° Aux intensités prises par plusieurs dérivations alimentées par un conducteur commun ;

3° Aux flux traversant le même circuit magnétique, tout en étant dus à des forces magnétomotrices différentes.

1° Force électromotrice effective ; force électromotrice génératrice. — 30. Dans le cas général, un circuit de courants alternatifs est toujours le siège de plusieurs forces électromotrices, parmi lesquelles il y a lieu de distinguer.

1° La *force électromotrice génératrice* agissant aux bornes du circuit ;

2° Les *diverses forces électromotrices de réaction*, force électromotrice de self-induction, d'induction mutuelle ; différences de potentiel aux bornes de condensateurs, etc., engendrées, dans chaque partie du circuit, par les variations périodiques du courant.

L'intensité du courant, dans la résistance ohmique constituant le conducteur, résulte de l'action simultanée de ces forces électromotrices. Bien que les forces électromotrices de réaction aient évidemment leur première origine dans la force électromotrice génératrice, on peut, au point de vue qui nous occupe, les considérer au même titre que celle-ci. C'est ainsi que, dans un circuit de courant continu alimentant un moteur, la force électromotrice induite par sa rotation intervient exactement de la même manière que si elle était due à une seconde génératrice établie en opposition par rapport à la première.

On appelle *force électromotrice effective* la force électromotrice qui, agissant seule dans le circuit considéré, produirait, conformément à la loi d'Ohm, l'intensité efficace I dont ce circuit est le siège. Elle est donc numériquement égale à la force électromotrice continue qui, établie aux bornes du même circuit, produirait une intensité continue égale à la valeur efficace I. C'est encore la chute de potentiel e d'où résulte l'échauffement $\frac{e^2}{R}$ du conducteur.

En appliquant aux forces électromotrices agissant dans le circuit, sans distinction d'origine, les considérations énoncées plus haut, on voit que la force électromotrice effective n'est autre que leur somme géométrique ; elle sera donc définie, en grandeur et en phase, par la ligne de fermeture du polygone des vecteurs relatifs à ces forces électromotrices.

Il résulte d'ailleurs de sa définition que sa valeur numérique est RI, et que le courant coïncide en phase avec elle.

Inversement, si l'on prend comme données la force électromotrice effective et les forces électromotrices de réaction, on en déduira la force électromotrice génératrice, en observant que celle-ci est la somme géométrique de la force électromotrice effective d'une part, et, de l'autre, de forces électromotrices équilibrant respectivement les forces électromotrices de réaction, c'est-à-dire égales et de sens contraire à celles-ci.

2° *Intensité totale.* — 31. Il résulte immédiatement de la loi générale que l'intensité dans le circuit principal alimentant n dérivations est la *somme géométrique des intensités relatives à chaque dérivation.*

3° *Flux effectif.* — 32. De même, le flux total engendré dans un circuit magnétique par n bobinages alimentés respectivement par des courants distincts est la *somme géométrique des flux engendrés séparément par chaque bobinage* (abstraction faite des lignes de force qui se ferment en dehors du circuit considéré).

Ceci s'applique d'ailleurs aux flux de réaction, exactement comme si ces flux avaient une origine propre indépendante du flux générateur. Tout ce qui a été dit sur la composition des forces électromotrices s'applique sans modification à la composition des flux. On appellera flux effectif le flux :

$$\Phi = \mathcal{B}S$$

qui, s'il agissait seul, produirait dans le fer la même induction efficace $\mathcal{B}$ que l'ensemble des flux agissants. Ce sera donc encore la somme géométrique de ceux-ci.

Le flux générateur s'obtiendra en composant le flux effectif avec les flux de réaction changés de sens.

33. En résumé : *Dans un circuit où agissent plusieurs forces électromotrices définies en grandeur* (1) *et en phase :*

1° *La force électromotrice effective est la somme géométrique des forces électromotrices agissantes ;*

2° *La force électromotrice génératrice est la somme géométrique de la force électromotrice effective et des forces électromotrices de réaction changées de sens.*

Dans le circuit principal alimentant des dérivations, l'intensité totale du courant est égale à la somme géométrique des intensités partielles relatives à chaque dérivation.

Dans un circuit magnétique où agissent plusieurs forces magnétomotrices définies en grandeur et en phase par les ampèretours correspondants, le flux effectif est la somme géométrique des flux partiels déterminés par chacune des forces magnétomotrices agissantes.

TRAVAIL DES COURANTS ALTERNATIFS ; INTENSITÉ WATTÉE ET INTENSITÉ DÉWATTÉE ; FACTEUR DE PUISSANCE

34. Nous avons vu, au paragraphe 24, que la puissance d'un courant alternatif était égale au produit :

$$W = EI \cos \varphi$$

des valeurs efficaces de la force électromotrice et de l'intensité du courant par le cosinus de l'angle de décalage de ces facteurs.

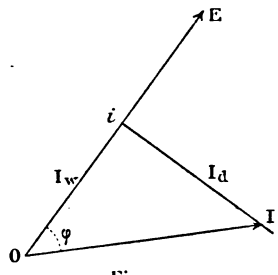

Fig. 11.

Soient (fig. 11) OE et OI leurs vecteurs, décalés de l'angle φ, et soit Oi la projection de OI sur OE. Le vec-

(1) Ici, comme dans tout ce qui suivra, c'est toujours par leurs valeurs efficaces que seront définies les grandeurs numériques des facteurs considérés.

teur OI peut être considéré comme étant la résultante de O*i* et *i*I : c'est-à-dire que l'intensité efficace I est la somme géométrique de deux intensités de valeurs efficaces respectivement égales à O*i* et *i*I, et telles que les courants correspondants soient, le premier en phase avec E, le second décalé de $\frac{\pi}{2}$.

Le travail du premier courant a pour expression :

$$W = Oi \times E = EI \cos \varphi$$

celui du second est nul, puisque $\cos \frac{\pi}{2} = 0$.

Il en résulte que, quelle que soit la valeur efficace I, la composante O*i* intervient seule comme facteur de la puissance développée. On la nomme, pour cette raison, composante *wattée* de l'intensité totale, ou *intensité wattée* (I_w) du courant ; et la composante *i*I prend le nom de composante *déwattée* ou intensité *déwattée* (I_d).

Entre l'intensité totale I et les deux composantes ci-dessus, on a les relations :

$$I^2 = I^2_w + I_d^2$$
$$I_w = I \cos \varphi$$
$$I_d = I \sin \varphi$$

et :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_d}{I_w}$$

Le facteur $\cos \varphi$ se nomme *facteur de puissance*.

CHAPITRE II

CIRCUITS DE COURANTS ALTERNATIFS

Polarité instantanée des conducteurs ; phénomènes généraux. — Effets de la *self-induction ;* résistance apparente, facteur d'impédance ; décalage du courant : ses effets. — Circuits dérivés ; composition des intensités ; impédance réduite de *n* dérivations. — *Capacité ; condensateurs.* — Courant dans un circuit comprenant un condensateur ; résistance apparente du circuit ; décalage du courant. — Condensateur en dérivation aux bornes d'un réseau ; effet de la composante déwattée ; relation entre la capacité et la self du réseau pour un décalage nul. — Condensateur en série sur une self.

35. *Pôles relatifs ; polarité instantanée des conducteurs.* — Dans un circuit parcouru par un courant alternatif, le sens du courant change deux fois par période Si donc F est la fréquence de la source, il se produira, par seconde, 2F changements de sens ; ou inversement, la durée pendant laquelle le courant, tout en variant d'intensité, reste de même sens dans le circuit, sera de $\frac{1}{2F}$ secondes.

Pendant cette durée, le courant part d'une intensité nulle, croît en valeur absolue jusqu'à un maximum, et décroît ensuite jusqu'à o.

Il est évident que, dans ces conditions, la notion de polarité, telle qu'on l'envisage dans la plupart des applications des courants continus (notamment dans les cas où il s'agit de produire des phénomènes nécessitant un

sens de courant constant, tels que l'électrolyse, etc.), n'a pas d'équivalente en courants alternatifs.

La question de polarité relative, à un instant ou pendant un temps donné, intervient cependant dans plusieurs cas.

Considérons par exemple deux circuits alimentés par une source génératrice commune. Si l'on veut les réunir en un point de leur parcours, il est évident que la jonction ne pourra pas être arbitrairement faite de l'un quelconque des conducteurs constituant le premier circuit à un quelconque de ceux constituant le second, car on aurait une chance sur deux de mettre la génératrice en court-circuit. Le cas se présente donc en somme exactement comme s'il s'agissait de courants continus : les deux conducteurs que l'on peut relier ensemble étant ceux qui, à un instant quelconque, sont au même potentiel.

Il en est de même dans tous les cas où il s'agit de coupler en parallèle des unités génératrices, alternateurs ou secondaires de transformateurs : il faudra déterminer tout d'abord les bornes qui, dans les appareils à coupler, sont constamment au même potentiel.

Le terme de pôles, employé dans le cas des courants continus, ne s'applique plus ici, mais la notion équivalente pour les cas ci-dessus n'a pas reçu de dénomination spéciale. Sur les schémas, on désigne par $\pm$ et $\pm$ deux points à des potentiels constamment égaux; par $\pm$ et $\mp$ deux points tels que le potentiel passe par son maximum positif sur l'un à l'instant où il passe sur l'autre par son maximum négatif.

Phénomènes généraux. — 36. 1° *Self-induction des circuits.* — Tout circuit fermé délimite un flux qui, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnel à la surface limitée par le circuit, et inversement proportion-

nel à la résistance magnétique, ou réluctance du milieu siège des lignes de force.

Dans le cas où le courant est alternatif, la valeur du flux variant en fonction du temps, il s'ensuit que le circuit sera le siège d'une force électromotrice induite de même fréquence ayant pour valeur instantanée :

$$e_x = -\frac{d\Phi}{dt}$$

soit, en désignant par L le coefficient de *s. i.* du circuit :

$$e_x = -L\frac{di}{dt}$$

Dans le cas général, un même circuit sera le siège de plusieurs forces électromotrices induites de la sorte, qui se composeront avec la force électromotrice génératrice appliquée aux bornes pour donner comme résultante la force électromotrice effective produisant le courant dans le circuit.

37. 2° *Courants de Foucault.* — Tout milieu conducteur situé dans un champ alternatif constitue un ensemble de circuits sièges de forces électromotrices induites donnant naissance à des courants alternatifs qui se ferment dans le milieu considéré.

Ces courants suivent des trajectoires circulaires dans des plans normaux aux lignes de force du champ. Leur dénomination spéciale (courants de Foucault) n'implique d'ailleurs aucune différence entre leur nature et celle des courants induits dans les conditions ordinaires : la seule distinction que l'on puisse établir consiste en ce fait que ces derniers sont en général le résultat d'une génération prévue pour une utilisation donnée, tandis que les courants de Foucault n'ont le plus souvent (sauf quelques cas particuliers) d'autre effet que d'échauffer en pure

perte les conducteurs qui en sont le siège, empruntant au circuit l'énergie correspondante qui échappe de la sorte à l'utilisation.

38. 3° *Hystérésis.* — Lorsqu'un noyau de fer est placé dans un champ d'intensité variable, les variations correspondantes de l'aimantation induite empruntent au champ une certaine quantité d'énergie qui apparaît dans le fer sous forme de chaleur.

Ceci résulte de ce que le travail dépensé pour amener le fer de son état neutre à l'état défini par la valeur maxima $\mathfrak{B}_0$ de l'induction magnétique variable avec l'intensité de champ, n'est pas intégralement restitué lors du passage inverse de l'induction $\mathfrak{B}_0$ à l'induction 0. La différence entre l'énergie absorbée dans le premier cas et celle produite dans le second représente le travail perdu sous forme de chaleur; et l'énergie totale dissipée de la sorte dans un temps donné sera naturellement proportionnelle au nombre correspondant de fois que le fer a été successivement aimanté et désaimanté, et par suite à la fréquence de la force magnétomotrice.

L'hystérésis et les courants de Foucault rentrent donc dans la catégorie des actions parasites. Les relations suivantes permettent d'évaluer les pertes d'énergie auxquelles ces actions donnent lieu :

Pour les courants de Foucault dans le fer ;

$$W_f = 0{,}5\ PF^2\mathfrak{B}_0^2\ 10^{-11} \text{ watts-seconde.}$$

Pour l'hystérésis, suivant la qualité du fer,

$$W_h = (0{,}25 \text{ à } 0{,}40)\ PF\mathfrak{B}_0^{1,6}\ 10^{-7} \text{ watts-seconde.}$$

P désignant dans les deux cas le poids du métal, $\mathfrak{B}_0$ la valeur maxima de l'induction.

39. 4° *Induction mutuelle.* — Lorsque deux circuits

sont en présence, chacun d'eux intercepte une partie des lignes de force ayant leur origine dans le courant qui traverse l'autre circuit. Il en résulte des forces électromotrices induites qui interviennent, au même titre que les forces électromotrices de *s.i.* comme composantes de la force électromotrice.

40. 5° *Capacité des conducteurs.* — Lorsqu'on relie une source continue d'électricité, au potentiel constant V, à un conducteur de capacité C, ce conducteur se charge, c'est-à-dire qu'il devient au bout d'un certain temps le siège d'une quantité d'électricité Q au potentiel V, telle que :

$$Q = CV.$$

Pendant le temps nécessaire pour amener le potentiel du conducteur de sa valeur initiale à la valeur V, le circuit intermédiaire qui le réunit à la source a été traversé par un courant dont l'intensité décroissante a pour valeur à l'instant t :

$$i_t = \frac{V - V_t}{R}$$

V_t étant le potentiel du conducteur à l'instant t, R la résistance du circuit intermédiaire.

Une fois l'équilibre des potentiels établi, si le potentiel de la source vient à décroître de manière à prendre une valeur nouvelle $V' < V$, le phénomène inverse se produira, le conducteur se déchargeant dans la source ; de telle sorte que le circuit intermédiaire sera parcouru par un courant de sens inverse du précédent, et de valeur instantanée :

$$i'_t = \frac{V_t - V'}{R}$$

jusqu'à ce que le potentiel du conducteur ait pris la nouvelle valeur V'.

Dans le cas d'une source alternative, l'échange est ininterrompu, le conducteur se chargeant et se déchargeant alternativement deux fois par période. Le circuit intermédiaire est alors le siège d'un courant de même période que la force électromotrice de la source.

Ainsi, soit C (fig. 12) un condensateur dont les arma-

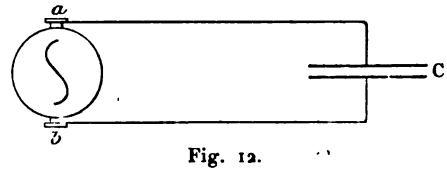

Fig. 12.

tures sont reliées aux bornes d'une génératrice alternative. Bien que le circuit *aCb* soit ouvert et que par suite sa résistance ohmique puisse être considérée comme infinie, il n'en sera pas moins le siège d'un courant alternatif, d'intensité proportionnelle à la capacité du condensateur, et de même période que la force électromotrice de la génératrice.

Les câbles concentriques, fréquemment employés pour les canalisations à haute tension, constituent des condensateurs ; il en résulte que, même à circuit ouvert, ils sont toujours le siège d'un courant d'intensité proportionnelle à leur capacité, et par suite à l'étendue de la canalisation.

41. Les charges et décharges successives d'un condensateur donnent lieu à une perte d'énergie sous forme de chaleur résultant du travail de polarisation alternative du diélectrique. Ce phénomène est de même ordre que l'hystérésis magnétique : le travail dépensé pour amener le diélectrique à un état de polarisation déterminé n'est pas intégralement restitué lors du retour, à l'état initial ; aussi lui donne-t-on le nom d'hystérésis diélectrique.

Les phénomènes dont l'action est, en général, prépondérante et la plus facile à analyser, sont ceux qui se rat-

tachent à la production de forces électromotrices d'induction (notamment de self-induction), et des courants de charge dus à la capacité des conducteurs. Nous allons en étudier les effets, d'abord dans deux circuits distincts, puis dans un même circuit.

SELF-INDUCTION

42. Considérons un circuit de résistance ohmique R et de coefficient de self L ; soit i la valeur instantanée du courant qui le traverse. Les forces électromotrices agissantes sont :

1° La force électromotrice génératrice e aux bornes du circuit ;

2° La forme électromotrice de self-induction e_s.

La force électromotrice effective est la résultante des deux précédentes. Son angle de décalage par rapport à e_s est égal à 90° ; en effet, on a :

$$e_s = -L\frac{di}{dt}$$

et :

$$i = I_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

soit, en remplaçant $\frac{2\pi}{T}$ par sa valeur ω (§ 9) :

$$i = I_0 \sin \omega t$$

d'où :

$$e_s = -\omega L I_0 \cos \omega t = \omega L I_0 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

et cette dernière expression montre que la force électromotrice de self-induction est en retard de 90° sur le courant, et par suite aussi sur la force électromotrice

effective. Les vecteurs relatifs à ces deux forces électromotrices seront donc les côtés de l'angle droit d'un triangle rectangle dont l'hypoténuse représentera par suite la force électromotrice aux bornes du circuit.

Les valeurs efficaces des facteurs ci-dessus étant respectivement E, I et $E_s = \omega LI$, traçons (fig. 13), avec le point O pour origine, OA = E, et décrivons sur OA comme diamètre une demi-circonférence. Conformément aux règles de la composition des vecteurs (§ 30), la seconde force électromotrice agissante E_s doit avoir son origine en A, et son extrémité sur la circonférence, puisqu'elle est perpendiculaire au troisième côté du triangle.

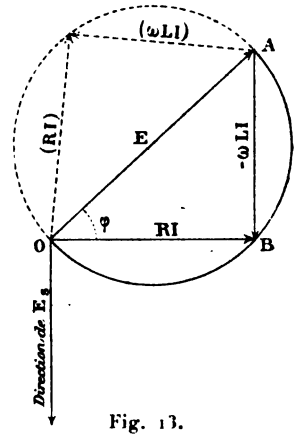

Fig. 13.

On tracera donc AB = ω LI, et le vecteur OB représente, en grandeur et en phase, la force électromotrice effective de valeur efficace RI.

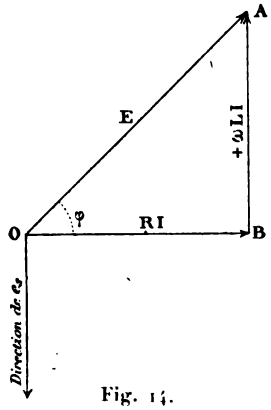

Fig. 14.

Le problème comporte évidemment deux solutions, car le point B pourrait *a priori* être porté sur le demi-cercle supérieur. Mais cette solution ne satisfait pas à la relation de phases établie précédemment entre RI et E_s, car elle conduirait à attribuer à l'intensité un *retard* de phase par rapport à la force électromotrice de self, contrairement à ce qu'indique l'équation (1). La première solution place bien RI en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur E_s.

La construction peut être conduite différemment. Traçons (fig. 14) OB = RI dans une direction arbitraire; sur la perpendiculaire au point B portons, dans le sens des angles d'avance (c'est-à-dire en sens contraire de son sens effectif), BA égale à ωLI. Le vecteur OA représente en grandeur et en phase la force électromotrice E (§ 33). Les directions respectives des trois vecteurs sont OB, BA et OA.

43. *Résistance apparente; impédance.* — Entre la force électromotrice génératrice appliquée aux bornes du circuit, et l'intensité du courant, le triangle rectangle OAB donne la relation :

$$E^2 = R^2I^2 + \omega^2L^2I^2,$$

d'où :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2L^2}}.$$

Dans la pratique, les appareils de mesure donnent directement E et I, tandis que l'on n'a, en général, aucune donnée sur les grandeurs des diverses forces électromotrices de réaction en circuit. En ne considérant que la valeur numérique I de l'intensité efficace qui, pour une force électromotrice génératrice E, traverse le circuit, on voit que l'on peut substituer à l'action combinée de ces forces électromotrices celle d'une résistance totale $\mathfrak{R}$, telle que :

$$\mathfrak{R} = \frac{E}{I}.$$

La quantité $\mathfrak{R}$ se nomme *résistance apparente* ou *impédance* du circuit.

L'impédance se réduit à la résistance ohmique lorsque le circuit ne comporte aucune force électromotrice de réaction. Dans le cas actuel, on a :

$$\mathfrak{R} = \sqrt{R^2 + \omega^2L^2} = R\sqrt{1 + \frac{\omega^2L^2}{R^2}}$$

c'est-à-dire que, à ce point de vue spécial, la force électromotrice de self-induction paraît accroître la résistance du circuit dans le rapport.

$$\frac{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}{R} = \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}.$$

On appelle *facteur d'impédance* le facteur par lequel il faut multiplier sa résistance ohmique pour obtenir la résistance apparente du circuit considéré. Si le circuit ne comporte que des forces électromotrices de self définies dans leur ensemble par la valeur L de son coefficient de self-induction, la valeur du facteur d'impédance sera

$$\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}.$$

44. Mais la présence d'une force électromotrice de self dans le circuit n'a pas pour seul effet d'accroître sa résistance apparente, c'est-à-dire de limiter l'intensité du courant à la valeur

$$\frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

elle produit en outre un décalage du courant par rapport à la force électromotrice génératrice. Si l'on se reporte au diagramme de la figure 13, on voit en effet que le vecteur de l'intensité, OB, est en retard sur celui de la force électromotrice génératrice, OA, de l'angle AOB $= \varphi$, tel que :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{AB}{OB} = \frac{\omega L}{R}$$

et

$$\cos \varphi = \frac{RI}{E}.$$

De cette dernière relation, on déduit :

$$I = \frac{E \cos \varphi}{R}$$

expression déjà démontrée dans le cas général (§ 23), et :

$$EI \cos \varphi = RI^2$$

soit :

$$W = RI^2$$

ce qui montre que, pour une intensité de courant donnée, la puissance dépensée dans le circuit est indépendante de la force électromotrice de self-induction. Ceci résulte d'ailleurs de ce fait, que cette dernière étant décalée de 90° par rapport au courant, la puissance :

$$W_s = E_s I \cos 90^\circ$$

est nulle.

45. On voit que la notion de résistance apparente ne suffit pas pour définir d'une manière complète le rôle d'une ou de plusieurs forces électromotrices de self-induction agissant dans un circuit donné. Si l'on pouvait considérer que leur action se réduit à celle d'un accroissement de résistance conduisant à attribuer à l'intensité du courant, pour une même force électromotrice E aux bornes, une valeur $I < \frac{E}{R}$, la valeur de la puissance électrique correspondante se trouverait simplement restreinte au produit $EI < \frac{E^2}{R}$, tandis que nous venons de voir qu'elle lui est inférieure dans le rapport de $\cos \varphi$ à 1.

Si ωL est très grand par rapport à R, l'expression

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

montre que φ sera très voisin de 90°, et dans ces conditions la puissance électrique sera sensiblement nulle, quelles que soient d'ailleurs les valeurs de l'intensité du courant et de la force électromotrice génératrice aux bornes du circuit.

46. En résumé, la self-induction des conducteurs produit les deux effets principaux suivants :

1° Elle accroît la résistance apparente $\frac{E}{I}$ du circuit ;

2° Elle décale le courant en arrière de la force électromotrice génératrice.

Nous allons étudier séparément ces deux effets.

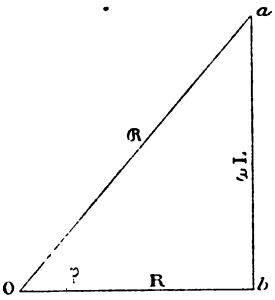

Fig. 15.

47. a. *Accroissement de résistance apparente.* — Traçons (fig. 15) le triangle rectangle ayant pour côtés de l'angle droit $Ob = R$, $ba = \omega L$; l'hypoténuse Oa sera égale à la résistance apparente du circuit considéré, car

$$\overline{Oa}^2 = R^2 + \omega^2 L^2$$

$$Oa = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \mathfrak{R}.$$

Le triangle Oab étant semblable au triangle OAB de la figure 14, on a :

$$aOb = \varphi.$$

En fonction de cet angle, la résistance apparente peut s'écrire :

$$\mathfrak{R} = R\sqrt{1 + tg^2\,\varphi}$$

ou encore :

$$\mathfrak{R} = \frac{R}{\cos\varphi}$$

Pour une résistance ohmique donnée, la résistance apparente du circuit variera donc en raison inverse du cosinus de l'angle de décalage (facteur de puissance).

48. Il est facile de vérifier expérimentalement la relation :

$$\mathfrak{R} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Ayant (fig. 16) constitué un circuit avec une résistance

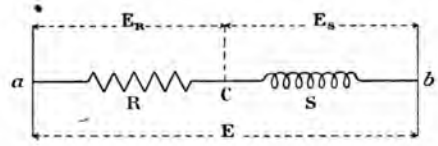

Fig. 16.

R sans self et une bobine de self S de résistance ohmique négligeable, on mesure séparément.

1° La perte de charge E_r dans la résistance R ;

2° La perte de charge E_s dans la bobine ;

3° La perte de charge totale E dans le circuit.

Ces quantités sont respectivement proportionnelles aux facteurs R, ωL et $\mathfrak{R}$. On trouvera dans tous les cas que E est inférieure à la somme $E_r + E_s$ des deux autres pertes de charge ; si le courant est sinusoïdal, on vérifiera la relation :

$$E^2 = E_r^2 + E_s^2$$

soit :

$$\mathfrak{R}^2 = R^2 + \omega^2 L^2$$

49. La divergence entre les valeurs respectives de la somme arithmétique des forces électromotrices en circuit d'une part, et de la force électromotrice aux bornes du circuit total, sera d'autant plus accusée qu'il y aura plus de forces électromotrices diverses en série.

En disposant dans le même circuit plusieurs selfs et plusieurs résistances en tension (fig. 17) la force électromotrice totale n'aura que la valeur OM, tandis que la

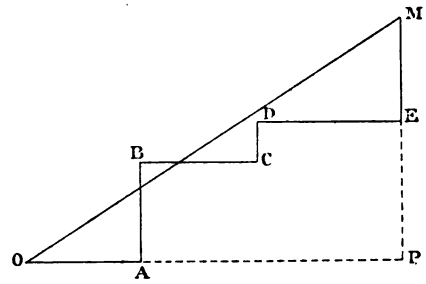

Fig. 17.

somme ci-dessus est égale à la longueur développée de la ligne brisée OABC.....M.

50. Remarquons d'ailleurs que les pertes de charge ohmique, ayant toutes le même calage qui est celui du courant commun, s'additionnent arithmétiquement pour donner la perte de charge totale OP, et il en est de même des forces électromotrices de self, dont le calage commun est à 90° du courant. Le polygone OABC.....M peut donc être remplacé par le triangle OPM, de telle sorte que les considérations précédentes, basées sur le cas d'une self et d'une résistance ohmique en circuit, s'appliquent à un nombre quelconque de selfs et de résistances ohmiques : *la force électromotrice de self totale et la force électromotrice effective étant respectivement la somme arithmétique des forces électromotrices de self partielles, et celle des pertes de charge ohmique dans les diverses parties du circuit.*

51. *Coefficient de self.* — Dans le circuit précédemment considéré (§ 48), connaissant les chutes de potentiel E_r et E_s, la résistance R, et la résistance *r* de la

bobine de self que nous avons considérée comme négligeable, mais qui peut, dans le cas actuel, posséder une valeur quelconque, on peut en déduire la valeur L du coefficient de self de la bobine.

On a en effet :

$$E_s = I\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$$
$$E_R = RI$$

d'où :

$$\frac{E_s}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{E_R}{R}$$

soit :

$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{R^2 \frac{E^2_S}{E^2_R} - r^2}$$

Il suffit donc de mesurer au pont R et r, et E_R et E_S au volmètre, ou mieux à l'électromètre.

La même mesure peut encore être faite sans qu'il soit nécessaire d'intercaler dans le circuit d'autre résistance ohmique que celle de la bobine de self. On mesure I, E_s et r, et l'équation :

$$E_s = I\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$$

donne la valeur de L.

$$L = \frac{1}{\omega I}\sqrt{E^2_s - r^2 I^2}$$

Il ne faut pas oublier d'ailleurs que ces méthodes supposent essentiellement *que la seule force électromotrice de réaction en circuit est la force électromotrice de self correspondant au coefficient* L *cherché.*

Elles ne seraient pas applicables au cas où la bobine considérée serait en outre le siège de forces électromotrices d'induction mutuelle, dues notamment à des courants de Foucault soit dans la carcasse de la bobine, soit dans le

fer de son noyau; non plus qu'au cas où l'hystérésis du fer ne serait pas négligeable.

52. *L'accroissement de résistance apparente ne donne pas lieu à une dépense supplémentaire d'énergie.* — En d'autres termes, malgré le surcroît de perte de charge dû à la self, l'échauffement du conducteur est constant pour une résistance ohmique donnée.

Car nous avons vu (§ 44) que le travail électrique dans le circuit se réduisait à l'effet Joule RI^2.

Il faut, dans ce cas encore, répéter la remarque précédente : la perte totale d'énergie transformée en chaleur dans la partie considérée du circuit n'a la valeur ci-dessus qu'autant qu'il n'y a en jeu ni hystérésis, ni courants de Foucault.

Bobines de self ou de réaction. — 53. On met cette propriété à profit dans l'établissement de rhéostats spéciaux pour courants alternatifs, dans lesquels la self joue le rôle principal. La différence fondamentale entre leur fonctionnement et celui des résistances proprement dites consiste en ce que, au lieu de produire une chute de tension occasionnant une dépense proportionnelle d'énergie, on oppose à la force électromotrice génératrice une action antagoniste qui ne fait que restreindre la puissance disponible, au lieu d'en absorber une partie.

Dans ces bobines de réaction, la résistance ohmique doit être, en principe, aussi faible que possible, de manière à restreindre la perte de travail par effet Joule. On ne peut toutefois annuler complètement la dépense d'énergie, alors même que le RI^2 est négligeable, par suite de ce fait que l'on est conduit, pour obtenir des forces électromotrices de self de valeur suffisante à constituer le circuit magnétique de la bobine avec du fer qui, même divisé, devient le siège de courants de Foucault et de pertes par hystérésis.

Néanmoins, la perte d'énergie dans une bobine convenablement établie peut être rendue très inférieure, pour une chute de potentiel donnée, à ce qu'elle serait si cette chute était uniquement obtenue par perte de charge RI.

Par contre, ce procédé conduit à décaler le courant, ce qui est toujours un inconvénient, ainsi que nous allons le voir.

Décalage du courant. — 54. *Pour un circuit de résistance ohmique et de self données, le décalage φ entre la force électromotrice aux bornes du circuit et l'intensité du courant qui le traverse est constant, quelle que soit la valeur de l'intensité.*

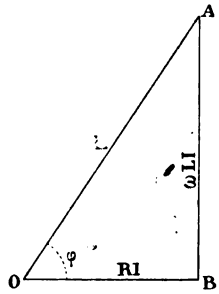

Fig. 18.

Car les côtés OB et AB (fig. 18) sont tous deux proportionnels à I; lorsque I varie, le triangle OAB reste semblable à lui-même, et par suite l'angle AOB = φ ne change pas.

La relation :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} = \left(\frac{\omega LI}{RI}\right)$$

montre d'ailleurs que le facteur I est éliminé de la valeur de φ.

55. *Détermination du décalage dans un circuit donné.* — *a.* Par le coefficient de self. — Lorsque l'on peut déterminer le coefficient de self du circuit, soit par la méthode du paragraphe 48, soit par tout autre moyen, ainsi que sa résistance ohmique, on en déduit directement par la relation :

$$(1) \qquad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

la valeur de l'angle φ.

b. Par le wattmètre. — La mesure du travail électrique W correspondant à une force électromotrice génératrice E et à une intensité de courant I, donne l'angle de décalage pour la relation :

$$\cos \varphi = \frac{W}{EI}.$$

Ce rapport est encore celui (§ 34) de l'intensité wattée I_w à l'intensité apparente ou totale I :

$$\cos \varphi = \frac{I_w}{I}.$$

Connaissant φ et R, on en déduit, réciproquement, la valeur de L par la relation (1).

Enfin, des appareils spéciaux (oscillographes, phasemètres) permettent d'évaluer le décalage par observation directe.

56. *Effets du décalage. — Le décalage du courant a pour effet de réduire dans le rapport de* 1 *à* $\cos \varphi$ *l'utilisation, sous forme d'énergie restituée dans les récepteurs, du courant traversant le circuit.*

Nous savons en effet (§ 34) que la valeur de l'intensité qui intervient comme facteur dans l'expression de l'énergie est seulement celle de la composante (fig. 11).

$$Oi = I_w$$

coïncidant en phase avec la force électromotrice génératrice : d'où :

$$W_\varphi = EI_w = EI \cos \varphi$$

tandis que, si le décalage était nul, la valeur de l'énergie disponible serait :

$$W_0 = EI$$

d'où :

$$\frac{W_\varphi}{W_0} = \cos \varphi$$

Réciproquement :

Pour une utilisation donnée, correspondant à la mise en œuvre d'une puissance déterminée W, le décalage aura pour effet d'accroître dans le rapport de cos φ à 1 l'intensité de courant nécessaire, la chute de potentiel restant la même.

Or, ce supplément d'intensité, qui ne produit pas de travail utilisable, n'en traverse pas moins les divers circuits (génératrice, ligne, réceptrice), donnant lieu à une perte de charge totale RI et à un échauffement RI^2, dans chacun de ces circuits, qui sont les mêmes que si le courant était watté, c'est-à-dire que si le décalage était nul.

57. Outre l'accroissement de perte de charge en ligne (somme géométrique des chutes de potentiel RI et ωLI), l'effet du déwattage est de restreindre l'utilisation des machines, génératrices ou réceptrices, établies pour une puissance déterminée. Car si la section du fil est calculée en vue de supporter sans échauffement dangereux l'intensité de courant correspondant à la puissance de la machine, il arrivera, par suite du déwattage, que la limite d'intensité pourra être atteinte bien avant la limite de puissance.

On sera donc amené, en prévision de ce fait, à établir des dynamos en réalité plus puissantes que les moteurs destinés à les conduire. Car nous savons que le courant déwatté n'absorbe de la puissance totale que la fraction Ri^2_d toujours relativement faible, correspondant à l'échauffement supplémentaire auquel il donne lieu dans le circuit.

Cet effet nuisible n'est pas le seul que le décalage du courant produise sur les génératrices. Nous verrons plus

loin, dans l'étude des transformateurs et des machines, que les réactions d'induit croissent rapidement avec le décalage, d'où une réduction dans l'utilisation et le rendement des appareils.

Circuits dérivés. — 58. D'après la loi énoncée au paragraphe 31, l'intensité dans le circuit principal alimentant n dérivations sera donnée, en grandeur et en phase, par la ligne de fermeture du polygone des intensités relatives à chaque dérivation.

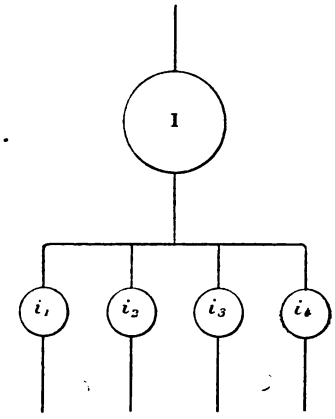

Fig. 21.

Si donc on considère (fig. 21) n circuits munis chacun d'un ampèremètre, et que l'on totalise la somme des indications, on trouvera un chiffre qui, dans le cas général, sera plus grand que celui fourni par l'ampèremètre totalisateur (I) ; l'écart étant d'autant plus accentué que les calages relatifs des diverses intensités diffèrent davantage, et se réduisant à o dans le cas particulier où tous les courants seraient de même phase.

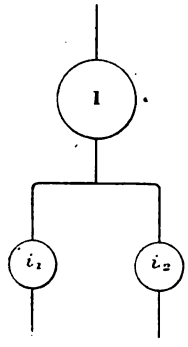

Fig. 19.

On peut déterminer pratiquement les décalages relatifs des divers courants de la manière suivante. Considérons d'abord deux dérivations i_1 et i_2 ; la connaissance des intensités i_1, i_2 ainsi que de l'intensité totale I (fig. 19 et 20), déterminera par ses trois côtés le triangle OAB des vecteurs, faisant ainsi connaître les

orientations relatives de ceux-ci, c'est-à-dire l'angle α de décalage des intensités partielles, ainsi que les an-

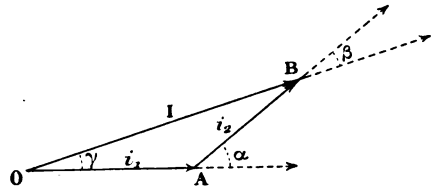

Fig. 20.

gles β et γ de chacune de ces intensités avec l'intensité résultante.

Supposons maintenant un nombre quelconque de dérivations 1, 2, 3....., n, que l'on puisse mettre successivement en circuit au moyen d'interrupteurs placés sur chacune d'elles.

On mettra d'abord en circuit les deux premières 1 et 2 seulement, et on construira comme précédemment le triangle OAB relatif à i_1, i_2 et à leur résultante I_{1+2} (fig. 22). On met ensuite 3 en circuit ; on lit l'intensité i_3, ainsi que la nouvelle valeur totale I_{1+2+3}. Cette dernière étant la somme géométrique de i_3 et de I_{1+2}, on pourra, sur OB $= I_{1+2}$ pour base, tracer le triangle OBC, d'où l'on déduit l'angle de calage de i_3 par rapport à i_1 et i_2 déjà déterminés. On procède ainsi de proche en proche jusqu'à la dernière dérivation.

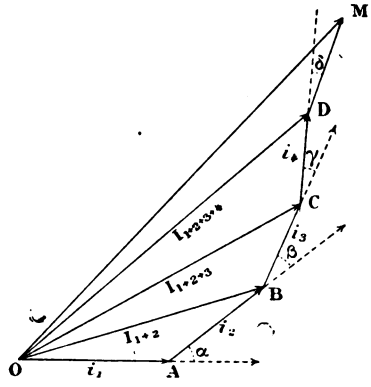

Fig. 22.

59. Si maintenant on veut connaître les décalages

$\varphi_1, \varphi_2, \ldots \varphi_n$ des intensités par rapport à la force électromotrice génératrice, il suffira de constituer une dérivation supplémentaire avec une résistance sans self ni capacité. L'intensité i_0 dans cette dérivation se trouvant de ce fait calée au même angle que la force électromotrice génératrice, son vecteur servira de direction origine par rapport à laquelle seront comptés les angles des autres vecteurs.

60. *Impédance, coefficient de self-induction, facteur de puissance du circuit total.* — Considérons d'abord le cas de n dérivations exactement identiques, possédant la même résistance ohmique et le même coefficient de self.

Toutes les intensités partielles étant de même phase s'ajouteront arithmétiquement, de telle sorte que la valeur de l'intensité dans le circuit principal sera :

$$I = ni.$$

Soient R et L la résistance ohmique et le coefficient de self communs à toutes les dérivations. Dans chacune d'elles, on a :

$$i = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

d'où :

$$I = ni = \frac{E}{\frac{1}{n}\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

soit :

$$I = \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{R}{n}\right)^2 + \omega^2 \left(\frac{L}{n}\right)^2}}$$

Tout se passe donc comme si, au lieu de n dérivations identiques, il n'en existait qu'une seule, de résistance

ohmique et de coefficient de self-induction respectivement n fois moindres.

L'impédance et le coefficient de self-induction décroissent donc proportionnellement au nombre des dérivations.

Par contre, l'angle de décalage du courant, et par suite le facteur de puissance du circuit total est constant quel que soit ce nombre.

On a, en effet, pour une seule dérivation :

$$\operatorname{tg} \varphi = \omega \frac{L}{R}$$

et pour n :

$$\operatorname{tg} \varphi' = \omega \frac{\frac{L}{R}}{\frac{n}{n}} = \omega \frac{L}{R} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Il en résulte que l'intensité déwattée totale I_d est proportionnelle à n. On a (§ 34), dans chaque dérivation :

$$i_d = i \sin \varphi,$$

comme d'ailleurs :

$$I = ni$$

on en déduit :

$$I \sin \varphi = ni \sin \varphi$$

d'où :

$$I_d = ni \sin \varphi = ni_d$$

Cas général. — 61. Dans le cas où les constantes L et R varient d'une dérivation à l'autre, il demeure évident que les variations de L, cos φ, I_d en fonction du nombre n auront respectivement les sens indiqués pré-

cédemment, tout en ne suivant plus la loi de proportionnalité. Il est d'ailleurs facile de déterminer graphiquement ces quantités, connaissant la résistance et la self de chaque dérivation.

Prenons (fig. 23) pour direction origine celle Ox du

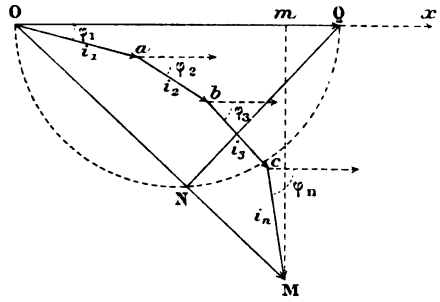

Fig. 23.

vecteur relatif à la force électromotrice génératrice aux bornes du réseau. Les vecteurs Oa, ab, bc... des intensités dans chaque dérivation font avec Ox des angles φ_1, φ_2, φ_3, donnés respectivement par les relations :

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \omega \frac{L_1}{R_1}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \omega \frac{L_2}{R_2}$$

etc...

La composition de ces vecteurs donne l'intensité totale $I = OM$.

Si maintenant on porte sur Ox la longueur $OQ = E$, et que l'on décrive sur OQ comme diamètre une demi-circonférence coupant OM en N, on aura, d'après la construction indiquée au paragraphe 42 :

$$ON = RI$$

$$QN = \omega LI$$

R et L désignant la résistance et le coefficient de self-induction du conducteur unique équivalent à l'ensemble des dérivations :

En particulier, pour $I = 1$, on aura :

$$ON = R,$$
$$QN = \omega L.$$

Les longueurs ON et QN représentent donc, à une échelle donnée, les constantes R, ωL du circuit considéré. On a d'ailleurs, comme valeur de l'angle de décalage :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{QN}{ON}$$

Si l'on projette M en m sur Ox, on aura :

$$Om = I_w$$
$$Mm = I_d$$

d'où la valeur du facteur de puissance :

$$\cos \varphi = \frac{Om}{OM}$$

62. En résumé, les principales modifications apportées dans un circuit par la self-induction des conducteurs sont les suivantes :

1° *Accroissement de la résistance apparente du circuit;* d'où accroissement, dans le même rapport, de la force électromotrice génératrice nécessaire pour produire un courant d'intensité donnée.

Mais la force électromotrice génératrice reste inférieure à la somme arithmétique des pertes de charge ohmique et des forces électromotrices de self en circuit; de plus, la perte d'énergie dans les conducteurs conserve

la valeur RI^2 correspondant à la même intensité I dans un circuit sans self.

2° *Réduction du travail électrique correspondant à une chute de potentiel* E *et à une intensité* I *données, d'où accroissement de l'intensité nécessaire pour produire un travail donné,* et comme conséquences :

1° Accroissement de la perte de charge en ligne ;

2° Accroissement de l'énergie RI^2 perdue de ce fait dans les conducteurs.

Mais l'intensité dans le circuit principal comprenant la génératrice reste inférieure à la somme des intensités dans les dérivations, sauf au cas particulier où les décalages seraient identiques dans toutes les dérivations.

Rappelons enfin que :

1° Les forces électromotrices de self-induction s'ajoutent arithmétiquement dans un même circuit, ainsi que les pertes de charge ohmique ;

2° Les intensités wattées d'une part, déwattées d'autre part, s'additionnent respectivement de la même manière.

CAPACITÉ, CONDENSATEURS

63. Un condensateur de capacité C, présentant à l'instant t entre ses armatures une différence de potentiel V, possède au même instant une charge Q, telle que :

$$Q = CV.$$

Si, dans le temps dt, la différence de potentiel varie de dV, la charge subira une variation corrélative :

$$dQ = C dV$$

d'où production dans le circuit réunissant les armatures à la source d'un courant d'intensité :

$$i = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt}$$

Si la variation du potentiel suit la loi sinusoïdale, il en sera par suite de même de l'intensité i. Soit, dans cette hypothèse :

$$(1) \qquad V = V_0 \sin \omega t,$$

on aura :

$$(2) \qquad i = C\frac{dV}{dt} = C\omega V_0 \cos \omega t$$

d'où, comme valeur maxima de l'intensité :

$$(3) \qquad I_0 = C\omega V_0.$$

64. Supposons les armatures du condensateur reliées aux bornes d'une génératrice de force électromotrice alternative e ; soit R la résistance ohmique des conducteurs. Les forces électromotrices agissant dans le circuit ainsi constitué seront e et $e_c = -V$; les équations (1) et (2) montrent que i est en avance de 90° sur V, d'où il résulte que la force électromotrice effective Ri sera en retard du même angle sur e_c.

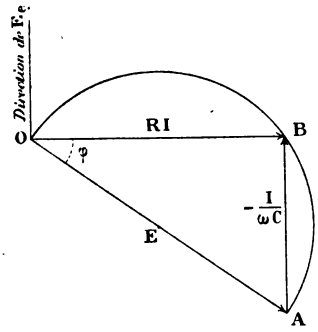

Fig. 24.

Soit $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ l'intensité efficace du courant ; les valeurs efficaces des forces électromotrices ci-dessus seront respectivement E, RI et $E_c = -\frac{I}{C\omega}$ (3). Si l'on applique

aux vecteurs relatifs à ces forces électromotrices la construction indiquée au paragraphe 42 (fig. 13), en tenant compte de la direction actuelle du vecteur AB, on obtiendra (fig. 24) le triangle OBA dans lequel le vecteur $OB = RI$ est, comme précédemment, la somme géométrique de $OA = E$ et de $AB = -\frac{I}{C\omega}$.

65. *Résistance apparente du circuit.* — Dans le triangle OAB, rectangle en B, on a :

$$E^2 = R^2I^2 + \frac{I^2}{C^2\omega^2}$$

d'où :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}}.$$

La valeur de la résistance apparente $\mathfrak{R} = \frac{E}{I}$ est donc dans ce cas :

$$\mathfrak{R} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}} = R\sqrt{1 + \frac{1}{C^2\omega^2R^2}}$$

et l'on appellera comme précédemment *facteur* ou *coefficient d'impédance le facteur* $\sqrt{1 + \frac{1}{C^2\omega^2R^2}}$ par lequel il faut multiplier la résistance ohmique R pour obtenir la résistance apparente ou impédance du circuit.

66. *Décalage du courant.* — Le diagramme montre que la force électromotrice effective RI et par suite l'intensité du courant sont en avance sur la force électromotrice E de l'angle φ tel que :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{C\omega R}$$

et :

$$\cos\varphi = \frac{RI}{E}.$$

En fonction de l'angle φ, on aura donc :

$$\mathfrak{R} = R\sqrt{1 + tg^2 \varphi}$$

ou encore :

$$\mathfrak{R} = \frac{R}{\cos \varphi}.$$

De :

$$\cos \varphi = \frac{RI}{E}$$

on déduit comme précédemment :

$$EI \cos \varphi = RI^2$$

Le travail dans le circuit se réduit donc à l'échauffement des conducteurs (1) : celui de la force électromotrice E_c étant nul par suite de son décalage de 90° par rapport au courant.

67. *Condensateur en dérivation sur un réseau donné.* — Il résulte de ce qui précède, que la dérivation constituée par le condensateur sera caractérisée par ce fait que le courant qui la traverse se trouvera en avance de phase sur la force électromotrice E aux bornes du réseau. Si la résistance des conducteurs réunissant les armatures au réseau est assez faible pour que l'on puisse négliger, devant la valeur de E, celle de la perte de charge ohmique RI, à laquelle ils donnent lieu, on aura :

$$I_c = C\omega E$$

et le décalage du courant par rapport à E sera de 90°.

---

(1) De même que nous avons, dans le cas de la self, négligé les actions parasites, nous laisserons ici de côté l'échauffement dû à l'hystérésis diélectrique.

Dans tous les cas, l'effet du condensateur sera d'introduire, comme composante du courant total, une intensité déwattée i_c. Si le réseau, supposé d'impédance négligeable, n'alimente que des récepteurs sans self, le courant débité par la génératrice sera, de ce fait, décalé en avant, par rapport à E, d'un angle φ donné par la relation (§ 34) :

$$\sin \varphi = \frac{i_c}{I},$$

I désignant l'intensité totale du courant dans le réseau : soit, dans le cas à peu près général où i_c se confond pratiquement avec I_c :

$$\sin \varphi = \frac{C\omega E}{I}.$$

68. Considérons maintenant le cas où, avant la mise

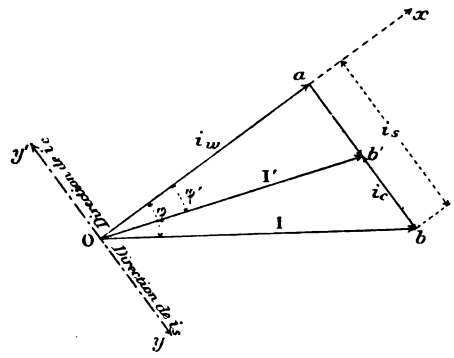

Fig. 25.

en circuit du condensateur, le courant dans le réseau se trouvait, par suite de la self-induction des récepteurs, en retard de phase sur la force électromotrice E. Son intensité I comportait dès lors une composante i_s calée à 90° en arrière de E : lors de l'introduction du con-

densateur, les deux intensités i_s et i_c, correspondant à des courants calés à 180° l'un de l'autre, donneront par suite une résultante numériquement égale à leur différence arithmétique $i_s - i_c$.

Si la capacité du condensateur est telle que l'on ait $i_c < i_s$, il en résultera à la fois une diminution du décalage initial, et de l'intensité I. Soit en effet (fig. 25) Ox la direction du vecteur relatif à E ; traçons $Ob = I$, et abaissons du point b la perpendiculaire ba sur Ox ; nous aurons :

$$Oa = i_w,$$

$$ab = i_s.$$

La composante déwattée i_c résultant de l'introduction du condensateur ayant la direction Oy', si l'on porte à partir du point b la longueur

$$bb' = i_c$$

il restera, comme composante déwattée du courant total, le vecteur ab'. La composante wattée Oa demeurant d'ailleurs invariable si la résistance des conducteurs qui relient le condensateur au réseau est pratiquement négligeable devant l'impédance de la dérivation, il en résulte que la valeur actuelle de l'intensité totale sera $Ob' < Ob$, et que son décalage par rapport à E, primitivement égal à bOa, se réduira à la valeur $b'Oa$.

Ainsi, dans les conditions ci-dessus, le fait d'ouvrir au courant une nouvelle dérivation a eu pour résultat de *diminuer son intensité,* au lieu de l'augmenter comme dans le cas général, en opposant au courant déwatté dans la ligne le courant de sens contraire allant au condensateur.

69. Pour $i_c = i_s$, les deux courants en opposition étant égaux s'annulent réciproquement, et la composante

déwattée du courant total se réduit par suite à o. Le décalage est nul, et l'intensité du courant dans le réseau possède la valeur minima compatible avec la puissance absorbée par l'ensemble des récepteurs.

Cherchons quelle valeur il convient de donner à la capacité du condensateur pour que ce résultat soit atteint.

Soient I l'intensité initiale du courant dans le réseau, φ son décalage par rapport à E. On a :

$$i_s = I \sin \varphi.$$

En supposant toujours les armatures du condensateur reliées au réseau par des conducteurs de très faible résistance ohmique, on aura :

$$i_c = C\omega E$$

d'où la condition :

$$C\omega E = I \sin \varphi$$

soit :

$$\frac{E}{I} = \frac{\sin \varphi}{C\omega}.$$

On a d'autre part :

$$\frac{E}{I} = R\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}},$$

L désignant le coefficient de self-induction de l'ensemble du réseau et des récepteurs, R leur résistance réduite. D'où :

$$\sin \varphi = C\omega R\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}.$$

De la relation :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

on déduit :

$$\sin \varphi = \frac{1}{R} \frac{\omega L}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}}$$

d'où :

$$\frac{1}{R} \frac{\omega L}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}} = C\omega R \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}$$

soit :

$$L = C\,(R^2 + \omega^2 L^2)$$

d'où la valeur cherchée :

$$C = \frac{L}{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

70. Si l'on donne à C une valeur supérieure à la valeur ci-dessus, l'intensité i_e qui lui est proportionnelle sera dès lors plus grande que i_s, et le courant dans le réseau sera en avance de phase sur la force électromotrice, car le point b' viendra au delà du point a sur la ligne ba (fig. 26). L'intensité du courant augmentera indéfiniment avec C.

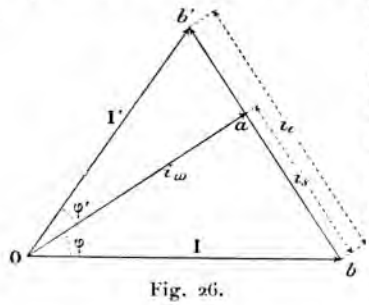

Fig. 26.

71. En résumé, un condensateur établi en dérivation entre deux points d'un réseau peut être, au point de vue spécial qui nous occupe, assimilé à une source secondaire qui émettrait, à chaque pulsation, un courant de sens opposé à celui du courant déwatté par la self-induction

des récepteurs et du réseau. Suivant la valeur de sa capacité, son action, pour une self-induction donnée, sera inférieure, égale ou prédominante : c'est-à-dire que le courant total restera décalé en arrière dans le premier cas, sera dans le second cas en phase avec la force électromotrice, et, dans le troisième, prendra l'avance sur la phase de celle-ci.

72. *Condensateur en série avec une self.* — La force électromotrice aux bornes de la self, a pour valeur efficace :

$$E_s = -\omega LI$$

Sa phase est de 90° en retard sur celle du courant.

La force électromotrice aux bornes du condensateur a pour valeur efficace :

$$E_c = -\frac{I}{\omega C}$$

sa phase est de 90° en avance sur celle du courant.

Les deux forces électromotrices E_s et E_c sont donc calées à 180° l'une de l'autre, et par suite la force électromotrice résultante aura pour valeur efficace la différence arithmétique E_s-E_c de leurs valeurs efficaces respectives.

Si l'on se reporte au diagramme de la figure 13, on voit que l'introduction d'un condensateur dans le circuit aura par suite pour effet de substituer au vecteur AB = ωLI un vecteur également perpendiculaire sur OB, mais de longueur égale à $\omega LI - \frac{I}{\omega C}$; suivant le signe de cette différence, le point A tombera au-dessus ou au-dessous du point B. Il en résulte que la résistance apparente du circuit aura dès lors la valeur

$$\mathfrak{R} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

et l'angle φ de décalage sera donné par la relation :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

En considérant, suivant la marche indiquée au paragraphe 33, la force électromotrice E comme résultante des forces électromotrices RI, $-E_s = \omega LI$ et $-E_c = \frac{I}{\omega C}$, le diagramme de la figure 14 devra, dans le cas actuel, être complété par l'adjonction du vecteur AC, dirigé en sens contraire de BA et de longueur égale à $\frac{I}{\omega C}$ (fig. 27).

Suivant que l'effet prédominant est celui de la self ou

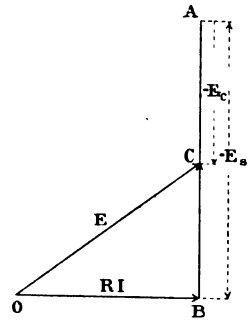

Fig. 27.

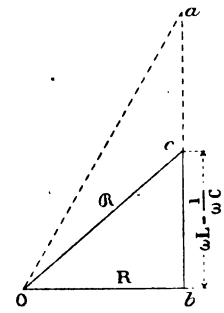

Fig. 28.

celui du condensateur, le diagramme affectera la disposition des figures 27 et 28, ou celle de la figure 29.

73. 1° — Supposons que l'on ait :

$$E^c < E^s, \text{ soit } \frac{1}{\omega C} < \omega L.$$

Le diagramme O*bac* (fig. 28) des résistances en circuit montre que l'*introduction du condensateur dans le circuit a eu dans ce cas pour effet de diminuer sa résis-*

tance apparente. Lorsque le circuit ne comportait qu'une self et une résistance ohmique, la valeur de la résistance apparente était O*a* : elle est actuellement égale à O*c*.

Le décalage du courant par rapport à la force électromotrice E a également diminué, et par suite le facteur de puissance a augmenté.

En somme, tout se passe comme si l'on avait réduit, dans le circuit primitif ne comportant pas de condensateur, la valeur L du coefficient de self-induction à la valeur L′, telle qué :

$$\omega L' = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

74. 2° — Pour :

$$E_c = E^s, \text{ soit } \frac{1}{\omega C} = \omega L$$

le point *c* coïncide avec le point *b* : *la résistance apparente se réduit à la valeur de la résistance ohmique et tout se passe en conséquence comme si le circuit ne comportait ni self, ni capacité*. Le décalage du courant est nul, et le facteur de puissance est par suite égal à l'unité.

75. 3° — A partir de la valeur ci-dessus :

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}$$

si l'on diminue la capacité du condensateur de manière à avoir :

$$\frac{1}{\omega C} > \omega L$$

le courant sera décalé en avant (fig. 29) et la résistance apparente du circuit augmentera indéfiniment avec les valeurs décroissantes de C.

Dans ce cas, la self en série avec le condensateur intervient pour *diminuer la résistance apparente que posséderait le circuit s'il ne comportait que le condensateur et la résistance ohmique.* Soit en effet *oba* (fig. 30) le dia-

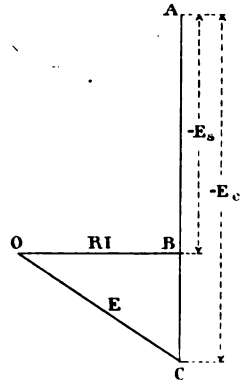

Fig. 29.

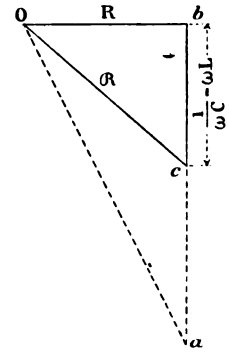

Fig. 30.

gramme correspondant à ce dernier cas. L'introduction d'une bobine de self dans le circuit, aura pour effet de substituer au vecteur $ba = \frac{1}{\omega C}$ le vecteur $bc = \frac{1}{\omega C} - \omega L$: de telle sorte que la résistance apparente du circuit, primitivement égale à Oa, possède actuellement la valeur Oc.

Tout se passe alors comme si, le circuit ne comportant pas de self, on avait substitué au condensateur de capacité C un autre de capacité C′ telle que :

$$\omega C' = \frac{1}{\omega C} - \omega L.$$

76. En résumé, on peut considérer que : 1° tant que l'action de la self est prédominante dans le circuit, c'est-à-dire tant que le courant demeure en retard de phase sur la force électromotrice, l'introduction d'un conden-

sateur en série *diminuera le coefficient de self apparent du circuit*, diminuant par suite sa résistance apparente et l'angle de décalage du courant jusqu'aux valeurs-limites $\mathfrak{R} = R$, et $\varphi = 0$.

2° Tant que l'action du condensateur est prédominante dans le circuit, c'est-à-dire tant que le courant demeure en avance de phase sur la force électromotrice, l'introduction d'une bobine de self en série *augmentera la capacité apparente du condensateur*, diminuant par suite la résistance du circuit et l'angle de décalage du courant jusqu'aux mêmes valeurs limites $\mathfrak{R} = R$ et $\varphi = 0$ que précédemment.

77. Si le circuit ne comportait à l'origine ni self, ni condensateur en série, l'introduction de l'un ou de l'autre de ces éléments aurait toujours pour effet d'accroître sa résistance apparente, primitivement égale à la valeur ohmique R. Il en résulte qu'au premier abord il peut sembler paradoxal que, dans certains cas, on prétende diminuer la résistance apparente d'un circuit en intercalant, soit un condensateur, soit une self qui sembleraient devoir l'augmenter. Mais il ne faut pas perdre de vue que la notion de *résistance apparente* est *purement fictive*. En réalité, la seule résistance en circuit est la résistance ohmique du conducteur ; l'introduction d'un condensateur ou d'une bobine de self n'apporte pas un supplément de résistance, mais bien une force électromotrice dont l'effet, suivant le cas, s'ajoutera à celui des autres forces électromotrices en circuit, ou s'en retranchera, de manière à modifier dans un sens ou dans l'autre la valeur de l'action antagoniste résultante tendant à restreindre l'intensité du courant. Or nous avons démontré que les forces électromotrices introduites dans le circuit par un condensateur et par une self tendaient à s'annuler mutuellement : il n'y a donc rien d'étonnant à ce que l'introduction de l'une ou de l'autre de ces forces électro-

motrices dans un circuit où l'autre existait seule comme antagoniste de la force électromotrice génératrice, puisse produire un accroissement de l'intensité primitive ; ce que l'on exprime en disant que la résistance apparente du circuit a diminué.

Pour qu'il en soit ainsi, la condition nécessaire et suffisante est évidemment que la valeur efficace de la force électromotrice introduite soit inférieure au double de celle de la force électromotrice déjà en circuit. Notons en passant que la force électromotrice E_c est inversement proportionnelle à la capacité du *condensateur* : donc au point de vue spécial qui nous occupe, l'action du condensateur antagoniste de celle de la self-induction du circuit, sera d'autant plus grande que sa capacité est moindre.

78. Il en résulte que dans la pratique il sera toujours facile de réaliser un condensateur *trop puissant* à ce point de vue, c'est-à-dire tel que la force électromotrice E_c, ayant une valeur trop grande, augmente, au lieu de la diminuer, la résistance apparente du circuit, produisant un décalage exagéré du courant en avant de la force électromotrice aux bornes E. Par contre pour que la force électromotrice $E_c = \frac{I}{\omega C}$ soit, pour une intensité I donnée, d'un ordre de grandeur suffisamment voisin de celui de la force électromotrice de self-induction correspondante $E_s = \omega LI$, il faudra donner au condensateur une capacité et par suite des dimensions telles, que sa réalisation et son emploi deviennent, dans la plupart des cas, impraticables.

Cette circonstance, et d'autres encore, telle par exemple que la destruction rapide de ces appareils par suite du percement du diélectrique, ont fait que l'emploi des condensateurs, malgré les nombreux avantages que l'on pourrait en retirer, n'a pas reçu la sanction de la pratique.

79. Une autre conséquence de ce fait que les forces électromotrices E_c et E_s sont, dans un circuit commun, antagonistes l'une de l'autre, est la suivante : leurs valeurs efficaces respectives peuvent être notablement plus élevées que celle de la force électromotrice génératrice E aux bornes du circuit.

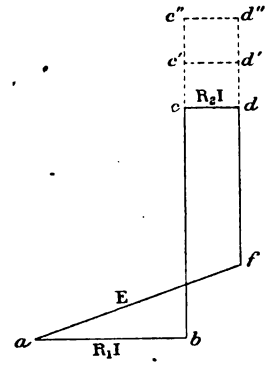

Fig. 31.

Considérons par exemple un circuit constitué par :

1° Une résistance ohmique R_1 ;

2° Une self ;

3° Une résistance ohmique R_2 ;

4° Un condensateur.

Le diagramme (fig. 31) des forces électromotrices en circuit montre que pour une valeur déterminée E de la force électromotrice aux bornes du circuit, les forces électromotrices E_s et E_c peuvent prendre des valeurs *bc*, *bc'*, *bc''* et *df*, *d'f*, *d''f* théoriquement indéfinies.

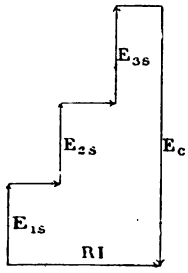

Fig. 32.

En particulier, si l'on compense au moyen d'un seul condensateur l'ensemble des forces électromotrices de self en série dans un même circuit, la valeur de la différence de potentiel aux bornes du condensateur, égale à la somme arithmétique de ces forces électromotrices, pourra être de beaucoup supérieure à celle de la différence de potentiel aux bornes du circuit (fig. 32).

CHAPITRE III

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT D'UN ALTERNATEUR CONSIDÉRÉ ISOLÉMENT

Force électromotrice induite ; fréquence ; transformation du travail mécanique en énergie électrique. — Détermination du flux effectif; réaction d'induit; influence du décalage. — Force électromotrice à circuit ouvert; résistance apparente de l'induit; sa détermination expérimentale : méthode de M. Behn Eschenburg. — Variation de résistance du circuit magnétique en fonction du décalage. — Caractéristique en circuit fermé sur une résistance ohmique. — Puissances respectives de l'alternateur et de son moteur. — Courts-circuits.

80. Une spire S décrit, d'un mouvement uniforme, une

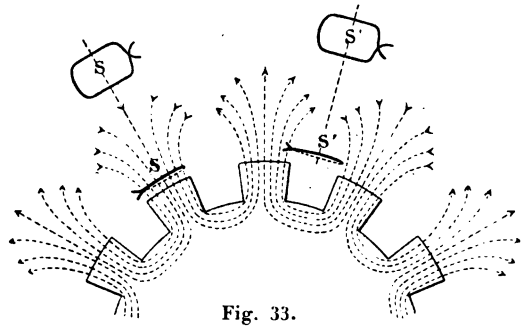

Fig. 33.

trajectoire circulaire dans un champ de lignes de force symétriquement distribuées, par exemple comme l'indique la figure 33. Le flux Φ limité par son contour varie d'une manière continue ; il est maximum en valeur

absolue, ou nul, suivant que la spire occupe, à l'instant considéré, l'une ou l'autre des positions S ou S'. Il résulte d'ailleurs de l'uniformité du mouvement et de la symétrie du champ, que la variation de Φ est périodique, et nous avons admis qu'elle suivait la loi sinusoïdale :

$$\Phi = \Phi_0 \sin \omega t \qquad \left(\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi F\right).$$

Dans ces conditions, la spire est le siège d'une force électromotrice :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

décalée de 1/4 de période par rapport au flux (§ 9). Elle est donc nulle en S, et maxima en S'.

Il est évident que les conditions restent les mêmes dans le cas où, la spire étant fixe, c'est le champ qui tourne.

Si, au lieu d'une spire, on considère une bobine de n spires placées dans des conditions identiques par rapport au flux, la force électromotrice induite sera égale à ne. Enfin, dans le cas général, l'induit de l'alternateur sera constitué par un nombre N de bobines égal au nombre des pôles inducteurs et également espacées de manière à se trouver, au même instant, dans la même position relativement au flux. Si l'on réunit en tension les extrémités de ces bobines, la force électromotrice totale aux bornes de l'induit sera nNe. On peut encore constituer l'induit par un certain nombre de groupes comprenant chacun n' bobines reliées en parallèle, ces groupes étant eux-mêmes reliés en tension ; la force électromotrice de l'alternateur ne sera plus dès lors que $n \frac{N}{n'} e$ mais il pourra débiter, à échauffement égal, une intensité n' fois plus grande que dans le premier cas.

Fréquence. — Dans chaque bobine induite, la période de la force électromotrice est limitée entre deux passages consécutifs devant un pôle de même nom, nord par exemple. La fréquence est donc égale au nombre de pôles nord passant par seconde devant une quelconque des bobines de l'induit ; s'il y a N bobines inductrices, soit $\frac{N}{2}$ pôles nord, chaque tour de l'inducteur, ou de l'induit, correspondra à $\frac{N}{2}$ périodes, d'où il résulte que la fréquence sera égale à $\frac{N\Omega}{2}$, Ω étant le nombre de tours par seconde de la partie tournante.

Transformation du travail mécanique en énergie électrique. — 81. Cette transformation est réalisée dans les alternateurs conformément à la loi de Lenz et de Maxwell :

« *Lorsqu'une variation de flux induit un courant dans* « *un circuit, le sens de ce courant est tel qu'il s'oppose à* « *la variation.* »

Dans le cas actuel, la variation ayant son origine dans le déplacement relatif du circuit par rapport au champ, c'est à ce déplacement que s'opposera l'action du courant induit, dont le travail sera constamment égal et de sens contraire au travail mécanique développé par le moteur.

L'expression du travail élémentaire correspondant à une variation $d\Phi$ du flux dans un circuit siège d'une intensité i est

$$d\mathcal{T} = -id\Phi$$

soit, comme :

$$d\Phi = -edt,$$
$$d\mathcal{T} = eidt,$$

d'où :

$$\mathcal{T} = \int eidt.$$

Ayant tracé (fig. 34) les sinusoïdes relatives à e et à i,

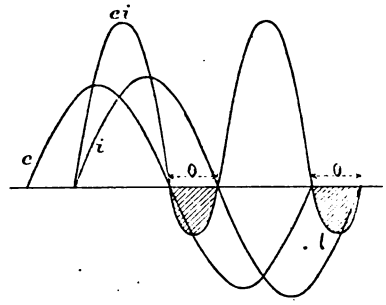

Fig. 34.

on en déduit, par multiplication des ordonnées, la puissance ei.

On remarquera que s'il existe un décalage entre les facteurs e, i, la puissance sera négative pendant les durées θ au cours desquelles les ordonnées des deux courbes sont de signes contraires. Les aires correspondantes, figurées avec des hachures, représentent du travail restitué par l'alternateur au moteur, par suite d'une transformation inverse d'énergie électrique en travail. Le travail total T, fourni effectivement par le moteur au cours d'une période, est donc la différence entre l'aire totale limitée par la courbe ei et l'axe des temps, et les aires décrites pendant les durées θ. La self-induction joue dans ce cas un rôle tout à fait analogue à celui de l'inertie d'un volant qui absorbe du travail pendant les périodes de vitesse ωl croissante, et le restitue lorsque la vitesse décroît.

Tant que le circuit induit reste ouvert, le facteur i se réduisant à o, le travail mécanique est nul quel que soit d'ailleurs le taux d'excitation des inducteurs, abstraction faite des diverses pertes d'énergie résultant

d'actions parasites (frottements, courants de Foucault, etc.). Lorsque l'alternateur débite, le travail absorbé croît — toutes choses égales d'ailleurs — proportionnellement à la demande de courant. Mais l'épure montre que le travail négatif augmente, pour une intensité donnée, avec le décalage du courant par rapport à la force électromotrice ; pour $\varphi = \frac{\pi}{2}$, les aires négatives et positives sont respectivement égales, et le travail est nul comme si l'alternateur fonctionnait à circuit ouvert, à cela près que les pertes sont accrues de la chaleur dégagée par effet Joule dans l'induit. Nous retrouvons ainsi le fait général, déjà signalé précédemment, qu'un courant décalé de 90° ne produit ni n'absorbe de travail.

Détermination du flux inducteur effectif. Réaction d'induit. — 82. A circuit ouvert, le flux inducteur est déterminé uniquement par les ampères-tours de l'inducteur et la réluctance du circuit magnétique. Pour un alternateur donné, tournant à une vitesse donnée, vitesse qui d'ailleurs est une des constantes de la construction, la force électromotrice à circuit ouvert est donc fonction seulement de l'intensité d'excitation, et cette fonction constitue une des caractéristiques de l'alternateur.

Mais dès que l'induit est le siège d'un courant, les ampères-tours correspondant donnent naissance à un flux dit flux de réaction, qui se compose géométriquement avec le flux émanant de l'inducteur. Il en résulte que le flux effectif (§ 32) qui donne naissance à la force électromotrice e, dépendra à la fois des ampères-tours de l'inducteur et de ceux de l'induit ; nous verrons qu'il varie, en outre, à intensité égale, avec le calage du courant.

Au point de vue de la génération de la force électromotrice induite dans l'alternateur, et abstraction faite de toute variation de réluctance du circuit magnétique en

fonction de la position relative des pôles inducteurs et induits (voir ci-après, § 89 et 90), on peut admettre que tout se passe comme si, les bobines de l'inducteur étant maintenues immobiles en regard de celles de l'induit, on substituait au courant continu d'excitation un courant alternatif de même période que celle de la force électromotrice qu'il s'agit d'obtenir.

Car un pareil courant aura pour effet de créer devant chaque bobine des pôles alternativement nord et sud, se succédant à des intervalles de temps égaux à ceux qui, dans les conditions réelles, séparent les passages de deux bobines inductrices consécutives devant la bobine induite considérée. La variation de flux par unité de temps, $\frac{d\Phi}{dt}$, sera donc la même dans les deux cas ; d'autre part, nous avons vu que la production proprement dite de la force électromotrice à circuit ouvert ne correspondait à aucune dépense de travail mécanique. Nous serons donc amenés à attribuer à des ampères-tours alternatifs dans un circuit inducteur fixe, l'origine du flux dont chaque bobine de l'induit est, à circuit ouvert, le siège.

Une fois le circuit fermé sur une résistance extérieure, le courant débité par l'alternateur donnera naissance à un flux de réaction de même période que le flux inducteur, et le flux effectif sera fonction des deux précédents.

En réalité, la question est complexe. Par suite de dérivations des flux dans le milieu ambiant, la totalité de leurs lignes de force respectives ne se ferment pas dans le même circuit magnétique ; de telle sorte que la règle de compositions des flux indiquée paragraphe 32 ne s'applique pas, dans le cas actuel, aux flux Φ_j et Φ_i respectivement proportionnels aux ampères-tours inducteurs et aux ampères-tours induits, mais à deux flux Φ'_j et Φ'_i différents des premiers de quantités $\delta\Phi_j$ et $\delta\Phi_i$ variables avec l'importance des fuites ou dérivations magnétiques, impor-

tance qui varie elle-même avec les conditions de débit (intensité et calage du courant).

En outre, la réluctance du circuit magnétique varie également avec ces conditions, ainsi que nous le verrons par la suite.

Il résulte de cet ensemble de circonstances, que les flux Φ'_j et Φ'_i suivent en réalité des lois plus complexes que celle des intensités correspondantes.

Toutefois, si l'on se propose de déterminer l'allure générale des phénomènes sans prétendre à l'exactitude numériquement rigoureuse des résultats, on pourra admettre comme approximation suffisante l'hypothèse en vertu de laquelle une spire quelconque de l'induit sera considérée comme limitant un flux Φ proportionnel à la somme géométrique des ampères-tours inducteurs et induits.

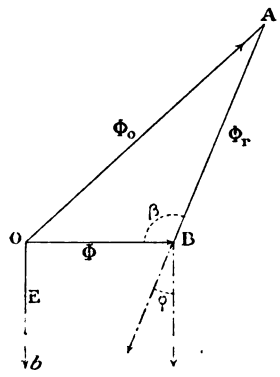

Fig. 35.

83. Soient dans cette hypothèse OA et AB (fig. 35) les vecteurs relatifs aux flux Φ_0 et Φ_r respectivement proportionnels aux intensités du courant d'excitation et du courant induit débité par l'alternateur. Le vecteur OB représentera, en grandeur et en phase, le flux effectif à travers une spire quelconque de l'induit.

Les longueurs OA et AB étant égales aux valeurs efficaces des flux Φ_0 et Φ_r, la longueur OB mesurera la valeur efficace du flux effectif. Il en résulte que la force électromotrice induite aura pour vecteur une droite de longueur $Ob = \omega \times OB$(1), perpendiculaire à OB dans le sens des angles de retard.

---

1) Rappelons en effet que l'on a :

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$$

Le courant débité par l'alternateur coïncidant en phase avec le flux Φ_r, son vecteur aura par suite la direction AB. Le décalage du courant par rapport à la force électromotrice de l'alternateur sera donc mesuré par l'angle φ des vecteurs AB et Ob.

84. On voit de suite que si, pour un décalage φ constant, l'intensité du courant débité par l'alternateur augmente, il faudra, pour maintenir constante la force électromotrice aux bornes, faire varier, dans le même sens, l'intensité du courant d'excitation, de telle sorte qu'à chaque valeur $I' > I$ déterminant un flux de réaction proportionnel $\Phi'_r > \Phi_r$, corresponde une valeur Φ'_0 du flux inducteur telle que la différence géométrique entre Φ'_0 et Φ'_r, conserve la valeur constante Φ (fig. 36).

En laissant l'excitation constante, la chute de tension

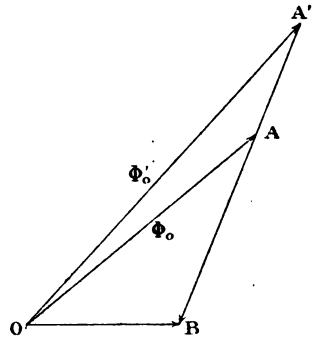

Fig. 36.

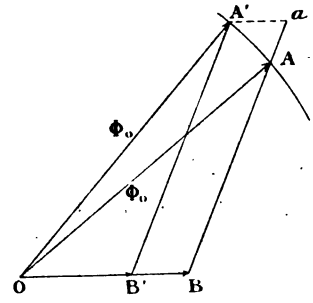

Fig. 37.

correspondant à un accroissement Aa du courant débité sur la ligne (toujours dans les mêmes conditions de calage), serait proportionnelle à la longueur BB' (fig. 37) :

---

d'où :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\omega\Phi_{max}\cos\omega t$$

soit :

$$e_{max} = -\omega\Phi_{max}$$

et :

$$e_{eff} = \omega\ \Phi_{eff} = \omega \times OB$$

le nouveau triangle OA'B' étant obtenu en déplaçant parallèlement à elle-même la droite B*a* jusqu'à ce que son extrémité *a* se trouve sur l'arc de cercle décrit du point O avec OA $= \Phi_0$ pour rayon.

Le même fait se produit dans le fonctionnement à intensité variable des dynamos à courant continu. Mais, dans le cas actuel, un autre facteur important intervient, indépendamment de la valeur absolue de l'intensité, pour accroître l'effet de la réaction d'induit : c'est le décalage φ du courant.

85. Si, pour une intensité I et par suite un flux de réac-

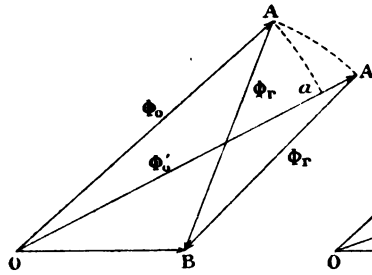

Fig. 38.

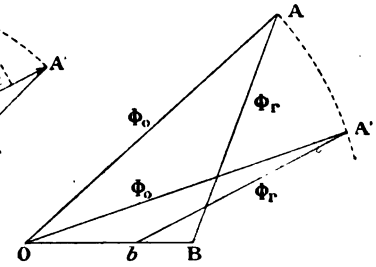

Fig. 39.

tion $\Phi_r =$ AB, constants, on donne à l'angle de décalage la valeur $\varphi' > \varphi$, on voit que le flux inducteur devra prendre, pour maintenir Φ constant, la valeur OA' $= \Phi'_0$ plus grande que la précédente de la longueur *a*A' (fig. 38). La chute de la tension qui résulterait de l'accroissement de décalage $\varphi' - \varphi$, le flux Φ_0 restant le même, serait proportionnelle à la longueur B*b* (fig. 39) obtenue en attribuant au vecteur AB son nouveau calage A'*b*, l'extrémité A restant sur la circonférence décrite du point O comme centre avec OA $= \Phi_0$ pour rayon.

D'une manière générale, on a (fig. 35) :

$$\Phi_0^2 = \Phi^2 + \Phi_r^2 - 2\Phi \times \Phi_r \cos \beta$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \varphi$$

d'où :

$$\Phi_0^2 = \Phi^2 + \Phi_r^2 + 2\Phi \times \Phi_r \sin \varphi.$$

La réaction d'induit est minima pour $\varphi = 0$, valeur pour laquelle :

$$\Phi_0^2 = \Phi^2 + \Phi_r^2$$

soit, pour le flux effectif :

$$\Phi^2 = \Phi_0^2 - \Phi_r^2.$$

Elle est maxima pour $\varphi = 90°$: on a alors :

$$\Phi_0^2 = (\Phi + \Phi_r)^2$$

soit :

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi_r$$

Dans le premier cas, le flux de réaction est à 90° du flux effectif ; dans le second, il est à 180° du flux inducteur, c'est-à-dire en opposition directe avec celui-ci, et s'en retranche par suite arithmétiquement.

Pour donner une idée de l'ordre de grandeur de ces actions (1), prenons le cas d'un alternateur tel que son flux de réaction soit égal à la moitié du flux inducteur :

$$\Phi_r = \frac{\Phi_0}{2}.$$

Pour un décalage nul, on a :

$$\Phi^2 = \Phi_0^2 - \Phi_r^2 = \Phi_0^2 \left(1 - \frac{1}{4}\right)$$

d'où :

$$\Phi = \Phi_0 \frac{\sqrt{3}}{2}$$

(1) Nous avons exagéré leur importance dans le tracé des diagrammes, afin de rendre ceux-ci plus clairs.

or, à circuit ouvert, on aurait :

$$\Phi = \Phi_0$$

La réaction d'induit due à un courant sans décalage occasionne donc dans ce cas une baisse de flux effectif, et par suite de force électromotrice, égale à :

$$\Phi_0 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 0{,}134\ \Phi_0$$

soit environ de 13 p. 100.

Pour un décalage de $\frac{\pi}{2}$, on aura :

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi_r = \Phi_0 \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2}\Phi_0$$

soit une chute de tension de 50 p. 100.

Force électromotrice à circuit ouvert ; chute de tension dans l'induit ; résistance apparente. — 86. Les considérations précédentes nous conduisent à considérer que le circuit induit n'est en réalité le siège que d'une seule force électromotrice, engendrée par les variations du flux effectif Φ. C'est cette force électromotrice :

$$E = -n\frac{d\Phi}{dt}$$

(n désignant le nombre total des spires de l'induit) qui est disponible aux bornes de l'alternateur, déduction faite de la perte de charge *ohmique* seule ; c'est donc la *force électromotrice de l'alternateur, ou force électromotrice génératrice proprement dite.*

En effet, à chaque état de régime défini par l'intensité du courant d'excitation d'une part, et d'autre part

par l'intensité et le calage du courant induit, correspond une valeur du flux Φ bien déterminée à chaque instant par la valeur au même instant de l'induction spécifique $\mathfrak{B}$ du fer. Ce flux est le seul existant dans le circuit magnétique limité par le bobinage induit : d'où la production d'une seule force électromotrice.

Mais on peut, théoriquement, prendre la question à un autre point de vue, et considérer que le circuit induit est à chaque instant le siège de deux forces électromotrices, l'une génératrice et l'autre de réaction, dont la différence géométrique constitue la force électromotrice *effective* de l'alternateur : force électromotrice qui sera dès lors celle que nous venons de définir par la notion du flux effectif.

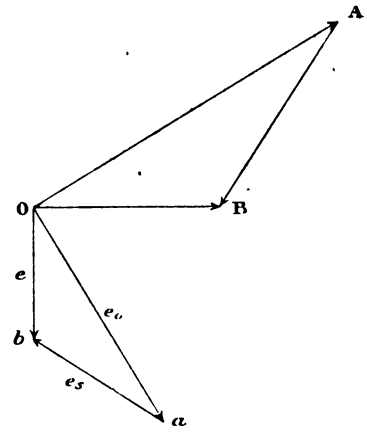

Fig. 40.

Reprenons (fig. 40), le triangle OAB des flux ; menons du point O, et dans les sens indiqués correspondant à des retards de phase, O*a* perpendiculaire à OA et égale à $\omega\Phi_0$ et *ab* perpendiculaire à AB et égale à $\omega\Phi_r$. Le premier vecteur sera celui de la force électromotrice e_0 que produirait le même flux inducteur Φ_0 dans le circuit induit *ouvert*; le second celui de la force électromotrice de self e_s engendrée dans le même circuit par le courant I qui le traverse.

La ligne O*b* fermant le triangle O*ab* représente en grandeur et en phase la force électromotrice effective *e* précédemment définie : car, de la similitude des triangles

O*ab*, OAB résulte que O*b* $= \omega\Phi$, et que cette droite est perpendiculaire au côté homologue OB.

Il s'ensuit que l'on peut considérer que *la force électromotrice totale E de l'alternateur est la force électromotrice effective dans un circuit où agissent, comme génératrice, la force électromotrice à circuit ouvert E_0, correspondant au taux actuel de l'excitation, et, comme réaction, la force électromotrice de self E_s correspondant à l'intensité du courant et au coefficient de self de l'induit.*

87. On voit que cette manière d'envisager les choses revient à admettre l'existence individuelle des deux flux Φ_0 et Φ_r, alors qu'en réalité le circuit magnétique est le siège du seul flux Φ, différence géométrique des deux premiers. Cette méthode suit donc de moins près, pour aboutir d'ailleurs au même résultat, les conditions réelles du fonctionnement. De plus, l'introduction d'une force électromotrice de self dans le circuit induit est de nature à créer une confusion, si l'on vient à perdre de vue que cette notion, ainsi d'ailleurs que celle de force électromotrice à circuit ouvert dans le cas d'un circuit effectivement fermé, est purement abstraite.

Par contre, la dernière méthode présente des avantages au point de vue de l'étude théorique et du calcul. A la notion complexe de flux dont les valeurs numériques, fonctions de la nature et des dimensions du circuit magnétique, ne se prêtent pas pratiquement à une mesure directe, elle substitue celle, plus simple, de deux forces électromotrices, ou comme nous allons le voir, celle d'une force électromotrice et d'une résistance apparente, susceptibles l'une et l'autre d'une détermination expérimentale.

Force électromotrice aux bornes de l'alternateur; résistance apparente. — 88. Dans le cas où l'on prend comme force électromotrice génératrice la

force électromotrice réellement induite E, la perte de charge dans l'induit est purement ohmique, et la différence de potentiel V utilisable aux bornes de l'alternateur est la différence géométrique entre E et RI. La résistance apparente de l'induit se réduit alors à sa résistance ohmique R.

Si, conformément à la seconde méthode, on prend pour force électromotrice génératrice la force électromotrice E_0 à circuit ouvert, il faudra, pour en déduire la différence de potentiel aux bornes, tenir compte de la force électromotrice de self E_s, en même temps que de la perte de charge ohmique. On est dès lors conduit à exprimer la chute de potentiel dans l'induit par le produit :

$$I\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

de l'intensité par l'impédance du circuit induit.

La considération d'impédance de l'induit est donc subordonnée à cette dernière manière de voir.

Détermination de la résistance apparente. Caractéristiques. — 89. Des deux facteurs R et L qui entrent dans l'expression de la résistance apparente, le premier peut être mesuré directement avec la plus grande facilité. Il n'en est pas de même pour le coefficient de self L, dont la valeur est variable avec l'état magnétique du fer, et avec la position relative des circuits inducteur et induit, position d'où dépend la longueur de l'entrefer, et par suite, la réluctance du circuit magnétique. Si, par exemple, on mesure le coefficient de self, d'abord lorsque les axes polaires sont en coïncidence (fig. 41), puis (fig. 42), dans la position pour laquelle les axes des inducteurs tombent à égale distance des axes de deux bobines induites consécutives, il est évident que la valeur trouvée sera plus grande dans le premier cas que dans

le second : l'écart numérique étant d'autant plus grand que les saillies polaires sont plus accentuées. En adop-

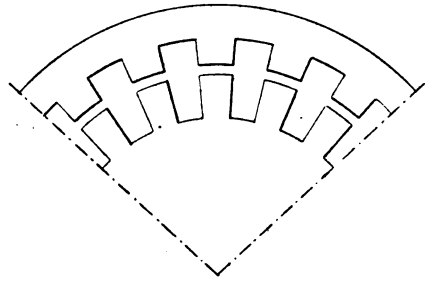

Fig. 41.

tant pour valeur de L une moyenne déduite d'une série d'observations relatives au positions extrêmes ci-dessus,

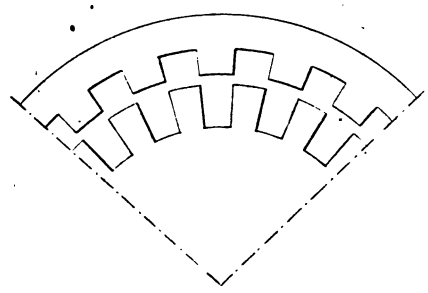

Fig. 42.

et à un nombre quelconque de positions intermédiaires, l'approximation obtenue pourrait, dans bien des cas, être insuffisante et conduire à des résultats erronés. C'est qu'en effet cette question de réluctance variable du circuit magnétique intervient lorsque varie le décalage, et voici comment :

90. Considérons un alternateur débitant sur un circuit constitué par une résistance purement ohmique, et très grande comparativement à la résistance apparente de son induit. Le courant se trouve alors, d'après la

première hypothèse, en phase avec la force électromotrice effective E, laquelle, en vertu de la seconde hypothèse, peut être considérée comme se confondant pratiquement avec la force électromotrice à circuit ouvert E_0. Le flux de réaction coïncidant alors en phase avec E_0, son maximum se produira à l'instant où l'inducteur occupe la position de la figure 42, c'est-à-dire à l'instant où la réluctance est maxima, tandis qu'au moment où elle devient minima (fig. 41), ce flux sera nul. Il est évident qu'il se trouve ainsi dans les plus mauvaises conditions possibles pour opposer son action à celle du flux inducteur, dont le maximum, quelles que soient d'ailleurs les conditions de circuit extérieur, a toujours lieu dans la position de la figure 41.

Supposons maintenant que l'alternateur débite sur une résistance inductive, numériquement égale à la précédente, la perte de charge ohmique étant dans ce cas négligeable devant la self. Le courant se trouve alors décalé à 90° en arrière de la position précédente, et il en résulte que le flux de réaction sera maximum à l'instant où la réluctance est minima. Son action antagoniste sera donc accrue de ce fait, indépendamment de la cause spéciale définie d'autre part (§ 84).

91. Car il faut bien voir que ces derniers faits sont d'une nature tout à fait différente de ceux signalés aux paragraphes ci-dessus. L'accroissement de réaction d'induit en fonction du décalage, tel que le met en évidence le diagramme (fig. 38), est indépendant de toute variation de réluctance : c'est en effet en supposant cette dernière constante que nous avons pu admettre la proportionnalité entre les flux et les ampères-tours correspondants.

Dans le cas présent, nous ne considérons par contre que la variation de flux corrélative d'une variation de réluctance, abstraction faite de tout autre ordre de phénomène ;

c'est la grandeur numérique du flux qui change, tandis que, dans le premier cas, c'était son orientation. Il y a là deux actions différentes, dont les effets s'ajoutent; de telle sorte que le diagramme de la figure 38 doit, pour en tenir compte, être modifié comme suit : le vecteur AB, figurant le flux de réaction, doit, en tournant de l'angle $\Delta\varphi$, s'accroître de la longueur A'A'' (fig. 43) représentant sa variation de grandeur numérique corrélative de la variation de réluctance, d'où il résulte que le taux d'excitation nécessaire pour maintenir constante la force électromotrice aux bornes de l'alternateur sera en réalité proportionnel à OA'', au lieu de OA'. On peut enfin mentionner ce fait que la variation numérique du flux de réaction, fonction de la réluctance, est essentiellement subordonnée aux formes de la machine, tandis que sa variation angulaire, fonction seulement du décalage, est la même, quel que soit le type de machine, pour des conditions identiques du circuit extérieur.

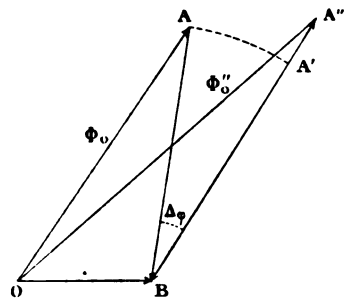

Fig. 43.

Méthode expérimentale directe. — 92. La résistance apparente d'un circuit étant, par définition, le rapport de la force électromotrice génératrice agissant dans le circuit, à l'intensité dont il est siège :

$$\mathfrak{R} = \frac{E}{I}$$

on pourra, en fermant l'induit sur lui-même en court-circuit à travers un ampèremètre, déterminer les valeurs de la résistance apparente correspondant à une série de

valeurs de l'intensité en court-circuit, à condition de connaître, pour chacune de ces intensités, la force électromotrice qui lui donne naissance.

Or, la notion d'impédance faisant entrer en ligne de compte la force électromotrice de self-induction de l'induit, la force électromotrice génératrice sera par suite la force électromotrice à circuit ouvert E_0, dont la valeur numérique peut être déduite, pour chaque valeur de l'intensité en court-circuit, de l'intensité d'excitation correspondante. Il suffit de tracer expérimentalement la courbe :

$$E_0 = f(j)$$

de la force électromotrice à circuit ouvert en fonction de l'intensité d'excitation j, pour la vitesse angulaire correspondant à la fréquence qui est une des constantes du régime.

Ayant d'autre part tracé la courbe :

$$I_0 = F(j)$$

de l'intensité en court-circuit en fonction de la même

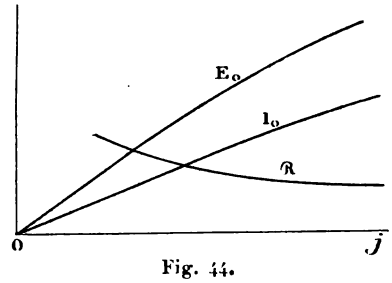

Fig. 44.

variable j, le rapport $\frac{E_0}{I_0}$ de deux ordonnées définies par la même abscisse j, donnera la valeur correspondante de la résistance apparente (fig. 44). On obtient ainsi la courbe figurative de la fonction $\mathfrak{R}$ pour les divers états de

magnétisation du fer, définis par les valeurs corrélatives de l'excitation.

93. Il est à remarquer que si la détermination de la caractéristique à circuit ouvert $E_0 = f(j)$ nécessite la constance absolue de la vitesse pendant toute la durée de l'expérience, il n'en est pas ainsi, en général, pour le tracé de la caractéristique en court-circuit $I_0 = F(j)$. Cette dernière fonction est, en effet, dans de très larges limites, indépendante des conditions de vitesse. Ceci résulte de ce fait que, dans presque tous les alternateurs, la résistance ohmique de l'induit est pratiquement négligeable devant sa self. On peut donc écrire :

$$I_0 = \frac{E_0}{\omega L} \text{ au lieu de } I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Mais :

$$E_0 = \omega \Phi_0$$

d'où :

$$I_0 = \frac{\Phi_0}{L}$$

On voit donc que la notion de vitesse, laquelle intervient par le facteur $\omega = 2\pi F$, se trouve éliminée de ce fait que la force électromotrice et la résistance apparente suivent l'une et l'autre la même loi de proportionnalité en fonction de ce facteur. Nous avons eu souvent l'occasion de constater, avec des alternateurs Ganz, que si l'on diminue progressivement la vitesse du moteur jusqu'à son arrêt complet, le débit en court-circuit correspondant à une intensité constante de l'excitation tombe presque instantanément à o pendant les dernières secondes de la marche correspondant à une vitesse très faible, sans avoir varié pendant la majeure partie de la période décroissante.

Cette condition est évidemment très favorable, car elle dispense d'avoir à établir et à maintenir, lors de l'essai en court-circuit, la machine dans des conditions de vitesse identiques à celles qui se trouvaient réalisées lors de l'essai à circuit ouvert.

94. Cette méthode, due à M. Behn-Eschenburg, présente sur la mesure séparée des coefficients R et L les importants avantages d'être réalisable avec les appareils de mesure que comporte le fonctionnement ordinaire de l'usine ; de donner des résultats indépendants de toute hypothèse sur la forme de la courbe relative à l'alternateur considéré, tandis que la relation :

$$\mathfrak{R} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

admet l'hypothèse sinusoïdale ; et, enfin, de tenir compte de l'état magnétique du fer, variable avec son degré d'aimantation puisqu'elle détermine $\mathfrak{R}$ en fonction des ampères d'excitation.

Mais les considérations développées précédemment montrent que les résultats ainsi obtenus ne sauraient en toute rigueur s'appliquer à des conditions de décalage différentes de celles qui se trouvaient réalisées lors de la marche en court-circuit. Le décalage était alors très voisin de 90°, car la résistance ohmique du circuit fermé constitué entièrement par l'induit, est sensiblement négligeable devant sa réactance, et nous savons que dans ce cas, la valeur numérique du flux de réaction se trouve être maxima pour un débit donné. Il en résulte que la courbe obtenue représente une limite supérieure des valeurs de $\mathfrak{R}$.

Entre ces valeurs et celles qui correspondraient aux conditions de marche sur un circuit extérieur sans self, l'écart peut varier notablement d'un type d'alternateur à un autre. La méthode ci-dessus ne sera rigoureusement

applicable que dans les cas où l'on pourra considérer cet écart comme pratiquement négligeable.

Nous allons pour l'instant admettre que cette dernière condition se trouve réalisée, afin de montrer comment la connaissance des courbes ci-dessous permet, dans cette hypothèse, de résoudre divers problèmes concernant le fonctionnement des alternateurs.

95. I. — *L'alternateur étant en marche normale sur le réseau.*

Déterminer, pour les conditions de fonctionnement actuel :

1° La valeur numérique de la force électromotrice E_0, considérée comme existant réellement.

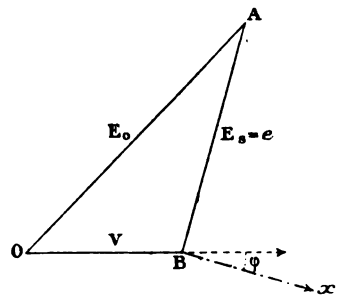

Fig. 45.

L'ampèremètre d'excitation donne la valeur j : il suffit de chercher la valeur correspondante de E_0 sur la courbe caractéristique du fonctionnement à circuit ouvert.

2° La chute de potentiel dans l'induit.

On trouve sur la courbe des résistances apparentes la valeur $\mathfrak{R}$ qui correspond à j ; l'ampèremètre de la machine donne d'autre part l'intensité débitée I : on en déduit :

$$e = \mathfrak{R}\mathrm{I}.$$

3° Le facteur de puissance (cos φ) du régime considéré, et par suite le décalage φ du courant par rapport à la force électromotrice aux bornes du réseau de distribution.

Cette force électromotrice V est la différence géomé-

trique entre la force électromotrice E_0 et la chute de potentiel e dans l'induit ; elle sera donc figurée par le côté OB du triangle ayant pour autres côtés $OA = E_0$ et $AB = e$. Comme d'ailleurs la résistance ohmique de l'induit peut être considérée comme négligeable devant sa réactance, le vecteur figuratif du courant sera dirigé suivant Bx, perpendiculaire sur AB, et l'angle φ sera l'angle des deux directions Bx et OB. Or, on a (fig. 45) :

$$\overline{OA}^2 = \overline{OB}^2 + \overline{AB}^2 - 2OB \times AB \cos \widehat{ABO}$$

soit :

$$E_0^2 = V^2 + e^2 - 2Ve \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$$

$$E_0^2 = V^2 + e^2 + 2Ve \sin \varphi$$

On connaît E_0 en fonction de l'excitation ; V, par le voltmètre de la machine ; e, par I, indiquée à l'ampèremètre, et par $\mathfrak{R}$ correspondant à l'intensité d'excitation ; on en déduit φ.

On obtiendra graphiquement cet angle, ayant construit le triangle des trois forces électromotrices ci-dessus, en menant Bx perpendiculaire à AB (fig. 45).

96. II. — *Tracer la caractéristique :*

$$V = f(j)$$

de l'alternateur supposé fonctionnant sur un circuit donné par les constantes r et l

On a :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega l}{r}$$

et, comme valeur de l'intensité dans le circuit :

$$I = \frac{V}{\sqrt{r^2 + \omega^2 l^2}}.$$

Posons :

$$Z = \text{Impédance du circuit} = \sqrt{r^2 + \omega^2 l^2}$$

d'où :

$$I = \frac{V}{Z}$$

d'où, comme valeur de la perte de charge dans l'induit :

$$e = \mathfrak{R}\,\frac{V}{Z}.$$

Ceci posé, on a :

$$E_0^{\,2} = V^2 + e^2 + 2Ve \sin \varphi$$
$$= V^2 + \left(\frac{\mathfrak{R}}{Z}\right)^2 V^2 + 2\,\frac{\mathfrak{R}}{Z}\,V^2 \sin \varphi,$$

d'où :

$$V^2 = \frac{E_0^{\,2}}{1 + \left(\frac{\mathfrak{R}}{Z}\right)^2 + 2\left(\frac{\mathfrak{R}}{Z}\right)\sin \varphi},$$

équation dans laquelle tous les facteurs du second membre sont déterminées en fonction des données du problème et de la variable j.

Pour un décalage nul on aurait :

$$V^2 = \frac{E_0^{\,2}}{1 + \left(\frac{\mathfrak{R}}{Z}\right)^2}$$

et pour un décalage de 90° :

$$V^2 = \frac{E_0^{\,2}}{1 + \left(\frac{\mathfrak{R}}{Z}\right)^2 + 2\,\frac{\mathfrak{R}}{Z}} = \frac{E_0^{\,2}}{\left(1 + \frac{\mathfrak{R}}{Z}\right)^2}$$

d'où :

$$V = \frac{E_0}{1 + \frac{\mathfrak{R}}{Z}}$$

Solution graphique.

Pour chaque valeur de j, on connaît E_0 et $\mathfrak{R}$. Traçons un cercle de rayon E_0 (fig. 46) et menons la droite Ox figurant la direction de l'intensité I, prise pour origine ; menons OA faisant avec Ox l'angle φ : ce sera la direction de V, et AP, perpendiculaire à Ox, qui sera la direction de e, en admettant que l'angle de réactance de l'induit soit égal à $\frac{\pi}{2}$, ce qui est sensiblement réalisé dans la pratique.

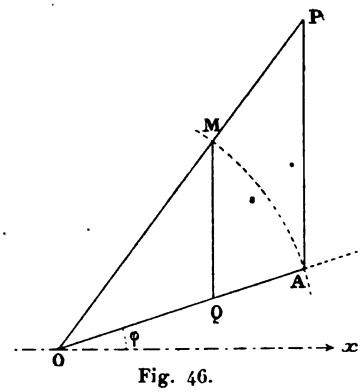

Fig. 46.

Prenons :

$$AP = \frac{\mathfrak{R}}{Z} E_0$$

joignons OP, et du point M abaissons MQ perpendiculaire à Ox : la valeur de V cherchée est OQ.

On a en effet :

$$\frac{MQ}{AP} = \frac{OQ}{OA} = \frac{OQ}{E_0}$$

d'où :

$$\frac{MQ}{\frac{\mathfrak{R}}{Z} E_0} = \frac{OQ}{E_0}$$

Comme d'ailleurs :

$$\frac{\mathfrak{R}}{Z} = \frac{e}{V}$$

on déduit de la relation précédente :

$$\frac{MQ}{e} = \frac{OQ}{V}$$

ce qui montre que les longueurs MQ et OQ représentent, à l'échelle choisie pour OM vecteur de E_0, respectivement les forces électromotrices e et V. On peut donc ainsi tracer par points la courbe de V en fonction de j.

97. *Déterminer les valeurs de l'excitation nécessaire pour maintenir* V *constant, lorsque* I *varie avec la condition* $\cos\varphi =$ *constante.*

Nous résoudrons la question inverse consistant à déterminer I en fonction de j; la courbe ainsi tracée permettra, réciproquement, de trouver j en fonction de I.

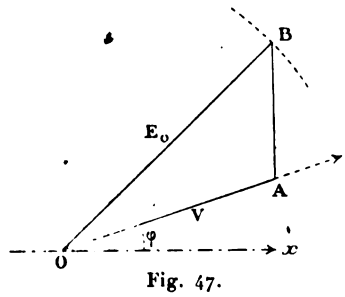

Fig. 47.

Pour chaque valeur de j, on connaît E_0 et $\mathfrak{R}$; on tracera Ox, direction de l'intensité prise pour origine (fig. 47) ; OA définie en direction par l'angle φ donné, et de longueur égale à V ; on élèvera AB perpendiculaire à Ox, et du point O comme centre avec $OB = E_0$ pour rayon, on décrira un arc de cercle jusqu'à la rencontre en B avec AB. On détermine ainsi e, d'où l'on déduit la valeur de I :

$$I = \frac{e}{\mathfrak{R}}.$$

98. *Déterminer les valeurs de l'excitation nécessaire pour maintenir* V *constant,* cos φ *variant pour une valeur constante de* I.

Nous traiterons comme précédemment la question

inverse : on se donne I et V, et on demande de déterminer cos φ en fonction de j.

On connaît les trois côtés du triangle : soit OA $=$ V, OB $= E_0$, déduite de la valeur de j, et BA $= e$ en fonction de j et de I. On obtiendra (fig. 47) l'angle φ en menant, du point O, Ox perpendiculaire à BA, cette droite étant ainsi la direction de l'intensité.

99. En résumé, on voit que, lorsqu'on pourra considérer la réluctance du circuit magnétique comme sensiblement indépendante des conditions de décalage, les caractéristiques de Behn-Eschenburg pourront fournir des résultats intéressants, soit qu'on les applique aux conditions actuelles de marche, soit qu'on s'en serve pour prévoir *a priori* les conditions de fonctionnement sur un réseau donné.

100. On peut encore déduire la réactance de l'induit de la méthode suivante. L'alternateur étant maintenu dans des conditions d'excitation et de vitesse constantes, on le fait débiter sur des résistances ohmiques décroissantes. Du fait de la réaction d'induit, la force électromotrice aux bornes V décroîtra depuis la valeur E_0 correspondant à une intensité nulle (circuit ouvert), jusqu'à la valeur o atteinte lorsque la résistance extérieure se réduit au court-circuit. Si donc on porte en abscisses les valeurs de l'intensité successivement croissantes de o à I_0, et en ordonnées celles correspondantes de la force électromotrice aux bornes V, on obtiendra (fig. 48), la courbe figurative de la fonction :

$$V = f(I)$$

pour les conditions données d'excitation et de vitesse.

Considérons l'ordonnée V_p d'un point quelconque P de cette courbe. La résistance ohmique de l'induit ayant été préalablement déterminée par mesure directe, pro-

longeons cette ordonnée de la longueur PQ égale à RI_p : la valeur numérique de la force électromotrice effective de l'alternateur correspondant à l'intensité I_p sera mesurée

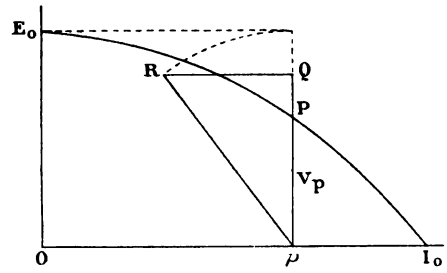

Fig. 48.

par la longueur pQ, somme de la force électromotrice V_p aux bornes, et de la perte de charge ohmique RI_p dans l'induit ; ces deux forces électromotrices coïncidant en phase, puisque le circuit siège de l'intensité I_p ne comporte pas de self. Décrivant ensuite du point p un arc de cercle avec E_0 pour rayon, et menant par le point Q une perpendiculaire à pQ jusqu'à la rencontre en R avec cet arc, la longueur QR mesurera la force électromotrice de self ωLI_p dans l'induit, d'où l'on déduira :

$$\omega L = \frac{QR}{I_p}.$$

101. Cette courbe fournit tout d'abord des renseignements intéressants sur l'importance de la réaction d'induit dans les conditions de marche les plus favorables, correspondant au wattage total du courant par rapport à la force électromotrice aux bornes. On peut les compléter en substituant aux résistances ohmiques, dans une seconde série d'expériences, des bobines de self.

Au point de vue de la détermination des facteurs ωL, on remarquera que le décalage du courant par rapport à

la force électromotrice constante E_0 varie d'un point à l'autre de la courbe. L'impédance du circuit total constitué par l'induit et la résistance extérieure R a pour valeur :

$$\mathfrak{R} = \sqrt{(R + r)^2 + \omega^2 L^2},$$

soit, en négligeant la résistance ohmique de l'induit :

$$\mathfrak{R} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

D'autre part, on a :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

Dans ces expressions, le facteur ωL varie relativement peu, tandis que R est susceptible de varier entre l'∞ et o. On voit donc que l'angle φ, très faible pour une résistance extérieure R très grande relativement à ωL, augmente au fur et à mesure que R diminue, pour atteindre des valeurs voisines de $\frac{\pi}{2}$ lorsque la résistance extérieure se réduit presque au court-circuit.

Dans ces conditions, l'effet des variations de réluctance du circuit magnétique en fonction du décalage sera mis en évidence par la comparaison des valeurs L_p, $L_{p'}$, $L_{p''}$ relatives à différents points P, P', P'' de la courbe.

102. Cette méthode présente donc sur la première l'avantage de faire entrer en ligne de compte l'influence des variations du circuit magnétique. Par contre, son application exige l'emploi d'un rhéostat fractionné extrêmement volumineux pour les grandes puissances. Il est vrai que ce rhéostat fait partie intégrante du matériel des usines où l'on pratique le couplage en parallèle des alternateurs d'après la méthode Ganz.

Variations du courant d'excitation. — 103. Nous

avons jusqu'à présent admis la constance parfaite du courant d'excitation. En réalité, il n'en est pas tout à fait ainsi. Abstraction faite des légères ondulations résultant de la génération même du courant continu, l'action périodique du flux engendré par les ampères-tours de l'induit se fait sentir sur le circuit inducteur, donnant naissance à une force électromotrice alternative qui superpose son action à celle de la force électromotrice continue génératrice.

Cette force électromotrice est de fréquence double de celle du courant alternatif qui produit le flux. En effet, les variations de ce dernier dans une spire de l'inducteur sont régies non seulement par celles du courant induit — ainsi que cela a lieu dans les spires de l'induit, — mais encore par le déplacement de la spire considérée dans le champ alternatif. Or, lorsque la spire se trouve à égale distance de deux bobines induites consécutives, le flux qui la traverse est nul, quelle que soit d'ailleurs à cet instant la valeur numérique du flux de réaction ; il le sera de nouveau lorsque l'intensité du courant induit passe par o. Comme d'ailleurs les deux faits ci-dessus ne sauraient se produire au même instant dans les conditions normales de marche (car ceci correspondrait à un décalage du courant égal à $\frac{\pi}{2}$ par rapport à la force électromotrice E_0, c'est-à-dire à une puissance nulle), il en résulte qu'à chaque période du courant alternatif correspondront quatre passages à o, soit deux périodes, du flux traversant la spire considérée.

Lorsque plusieurs alternateurs fonctionnent en parallèle, les réactions du circuit induit sur le circuit inducteur peuvent, dans certains cas, être très visibles sur l'ampèremètre d'excitation ; ceci correspond alors à des variations de longue période. Dans le cas actuel, le fait ci-dessus ne produit aucune action visible extérieurement,

mais il a pour conséquence d'induire des courants de Foucault dans l'inducteur, et de déformer la courbe du courant.

Variations de régime du circuit extérieur; réglage de la tension aux bornes de l'alternateur. — 104. Les récepteurs en dérivation sur le réseau sont, dans le cas d'une distribution à haute tension, uniquement constitués en général par des primaires de transformateurs. Dans ces appareils, ainsi que nous le verrons plus loin, l'intensité du courant varie d'une manière sensiblement proportionnelle à la demande de courant secondaire sur le circuit d'utilisation, pour un calage donné de ce courant, et le calage du courant primaire par rapport à la force électromotrice génératrice dépend à la fois de l'état de charge du transformateur, et du calage du courant secondaire.

105. Lorsque le circuit secondaire ne comporte que des lampes à incandescence, le calage du courant primaire ne dépend que de l'état moyen de charge des transformateurs, c'est-à-dire du nombre de lampes en fonction. Aux heures de faible charge, le décalage est maximum : le facteur cos φ s'abaisse à des valeurs comprises généralement entre 0,6 et 0,7, suivant la nature des transformateurs en service. Le décalage décroît au fur et à mesure de l'allumage sur le réseau secondaire ; le facteur de puissance atteint, au voisinage des conditions de charge normale pour les transformateurs, la valeur 0,90, 0,92 ou même 0,95 suivant les cas.

Il en résulte que si, d'une part, la réaction d'induit tend à augmenter en raison de l'accroissement numérique des ampères-tours, d'autre part la réduction de décalage tend à diminuer son action sur le flux inducteur. En général, le premier effet sera prédominant, et il faudra augmenter l'excitation au fur et à mesure de l'allumage ;

la régulation se fait dans ce cas d'une manière généralement lente et progressive.

106. Mais si le circuit secondaire alimente des appareils à grande réactance, donnant lieu par suite à un décalage notable du courant, tels que des moteurs asynchrones, la mise en circuit ou l'arrêt de ces apppareils peuvent tendre à produire de fortes variations de la tension aux bornes. Il s'ensuit qu'il est indispensable de disposer d'appareils permettant de faire varier dans des limites très étendues le taux d'excitation des inducteurs.

Cette régulation se fait par l'action combinée du rhéostat de champ de l'excitatrice et d'un rhéostat en circuit sur le courant d'excitation ; ce dernier doit pouvoir permettre de réduire l'intensité de ce courant à une valeur très faible, afin que la mise hors circuit des inducteurs ne donne pas naissance à une force électromotrice de self susceptible de compromettre leur isolement, ou celui de la dynamo excitatrice.

Puissance respective de l'alternateur et du moteur destiné à le conduire. — 107. La puissance indiquée d'un alternateur se chiffre toujours, comme celle d'une dynamo à courant continu, par le produit EI de la force électromotrice efficace et de l'intensité du courant que peut supporter le bobinage induit sans échauffement dangereux. Cette dernière condition limite la valeur de I, indépendamment de toute question de décalage, c'est-à-dire de puissance effective. Or, pour un décalage φ, le travail absorbé n'étant que EI cos φ, il s'ensuit que si le moteur a été calculé pour une puissance égale à EI, il ne fonctionnera jamais dans les conditions normales de charge prévue.

En admettant, en effet, que l'alternateur débite constamment l'intensité maxima I que son induit peut supporter, le travail fourni par le moteur ne sera, pendant

au moins les deux tiers du temps, que les sept dixièmes de la puissance nominale EI ($\cos \varphi = 0,70$), et il atteindra les neuf dixièmes de cette puissance au moment du maximum, soit environ pendant une heure sur vingt-quatre dans les conditions de marche ordinaires.

Si, par contre, on prend comme puissance du moteur la valeur du produit EI $\cos \varphi$, en choisissant pour $\cos \varphi$ la valeur 0,70 qui correspond à la plus grande durée de marche journalière, la puissance totale de l'alternateur pourra ne pas être utilisée pendant les heures de décalage minimum. Mais cette dernière alternative est préférable au point de vue économique. Car les conditions d'utilisation complète se trouvent alors réalisées pendant au moins les deux tiers du temps total, alors que, dans le premier cas, elles ne l'étaient approximativement que pendant une heure sur vingt-quatre. Il en résulte, outre l'amortissement plus rapide du matériel, un meilleur rendement moyen des machines à vapeur ; de plus, celles-ci possèdent en général l'élasticité nécessaire pour permettre une surcharge momentanée sans graves inconvénients, tandis qu'il peut être beaucoup plus dangereux de dépasser pour l'induit la température prévue comme maxima.

Court-circuit sur un alternateur. — 108. Les dangers d'un court-circuit en canalisation sont en général très atténués par la réaction d'induit dont l'effet est de diminuer le flux inducteur, et par suite la force électromotrice génératrice, en raison de l'accroissement du débit.

Dans le cas des machines à grande réaction d'induit, telles que les machines Ganz, cette action peut être autorégulatrice au point d'écarter tout danger immédiat de brûlure pour l'induit. De plus, le décalage étant, ainsi que nous l'avons vu, très grand dans les conditions du

court-circuit, le moteur ne subit de ce fait aucune surcharge.

Par contre, une brusque ouverture du circuit dans ces conditions — telle que la produirait la saute d'un plomb fusible, — déterminerait un accroissement de force électromotrice instantanée hors de toute proportion avec les conditions d'isolement prévues. Il faut donc s'abstenir, lorsqu'on emploie des machines de ce genre, de placer des coupe-circuits aux départs de ligne, car leur présence constituerait un danger réel, sans aucun avantage. En cas de court-circuit, il suffira de désamorcer progressivement l'alternateur, en agissant soit sur le champ de l'alternateur, par le rhéostat en circuit sur l'excitation, soit sur l'excitatrice même.

Il va de soi que ces conclusions ne s'appliquent qu'au cas de réactions d'induit importantes ; elles ne sauraient être étendues à tous les types d'alternateurs sans distinction.

CHAPITRE IV

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DES ALTERNATEURS EN PARALLÈLE

Synchronisation de deux alternateurs fermés en court-circuit l'un sur l'autre sans dérivation extérieure. — Cas général ; diagramme du couplage en parallèle ; intensités des courants et puissances respectives des alternateurs pour des excitations données ; cas où la puissance motrice est constante. — Courant de circulation ; condition pour qu'un des alternateurs fonctionne en réceptrice. — Stabilité de marche : action synchronisante du courant de circulation. — Détermination pratique des éléments du diagramme. — Conduite de la marche en parallèle ; couplage et découplage des alternateurs. — Cas d'un nombre quelconque d'alternateurs en parallèle ; conditions de stabilité de l'un d'eux considéré à part. — Influence des variations périodiques du couple moteur, et en général de l'ensemble des conditions motrices. — Procédés usuels de mise en parallèle.

Généralités. Synchronisation. — 109. Le couplage en parallèle a pour but de faire fonctionner en génératrices sur un réseau commun autant d'alternateurs qu'il en faut pour fournir l'intensité totale déterminée par les constantes de ce réseau : le courant débité par chacun des alternateurs s'ajoutant géométriquement à celui de $n-1$ autres. Nous admettrons toujours que les n alternateurs au couplage sont identiques.

La condition nécessaire est évidemment que tous les courants partiels ainsi produits soient de même période, ce qui exige l'égalité *mathématique* des vitesses pour tous

les alternateurs, si, ainsi que nous le supposons, leurs nombres respectifs de pôles inducteurs sont égaux.

Cette condition fondamentale étant remplie, un alternateur donné pourra fournir du courant au réseau, ou lui en emprunter. Dans le cas qui nous occupe, ce dernier fait ne pourra se produire que si le travail fourni à l'alternateur par sa machine motrice devient inférieur au travail dépensé intérieurement par actions parasites. L'alternateur fonctionnera dès lors en réceptrice. Pour toute valeur de la puissance motrice supérieure à la puissance ainsi absorbée, l'alternateur fonctionnera comme génératrice, quelles que soient d'ailleurs ses conditions de régime.

110. Le fonctionnement idéal serait réalisé en clavetant au même calage sur un arbre commun toutes les parties tournantes, que nous supposerons, pour fixer les idées, être les inducteurs. Dans ces conditions, en effet, les forces électromotrices induites coïncidant exactement en phase, les polarités instantanées des bornes reliées ensemble seront toujours de même signe ; et tout se passe, dans le circuit commun constitué par ces connexions, comme s'il reliait les pôles de même nom de dynamos à courant continu.

Mais, d'une part, une semblable disposition est pratiquement irréalisable dans la presque totalité des cas ; d'autre part, nous verrons qu'il n'est pas indispensable, pour que deux ou plusieurs alternateurs débitent sur le même réseau, que leurs forces électromotrices respectives soient exactement en phase. Pour ce qui concerne la condition de synchronisme, il est bien évident que si chaque alternateur est commandé par un moteur distinct, aucun réglage préalable, si parfait qu'il fût, ne saurait assurer l'égalité absolue et permanente des vitesses individuelles, si les couples mécaniques dus aux moteurs étaient seuls en jeu. Il en serait, d'ailleurs, de même

dans le cas où les alternateurs recevraient par courroies le mouvement d'une transmission motrice commune ; car alors l'inégalité dans les diamètres des poulies, et dans les glissements des courroies conduirait forcément à établir des différences entre les vitesses individuelles, et nous verrons plus loin que les conditions ainsi réalisées sont moins favorables au maintien du synchronisme, que celles résultant de l'emploi de moteurs distincts.

Cependant, l'égalité absolue et permanente des vitesses se trouve être réalisée d'une manière automatique, entre certaines limites du fonctionnement et pour des alterna-

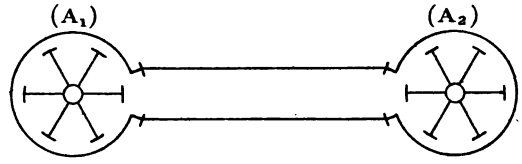

Fig. 49.

teurs et des machines motrices convenablement établis, par l'effet d'actions inhérentes aux conditions mêmes du fonctionnement.

111. Considérons d'abord le cas de deux alternateurs fermés l'un sur l'autre sans dérivation prise sur le circuit qui réunit leurs bornes.

Soit (fig. 49) (A_1) un alternateur fonctionnant à vide avec une fréquence F_1, et une force électromotrice induite E_1. Prenons un second alternateur animé d'une vitesse de rotation différente déterminant une fréquence F_2, et soit E_2 sa force électromotrice que nous supposerons, pour simplifier, égale à E_1.

Les fréquences étant différentes, les vecteurs respectifs de E_1 et E_2 décriront l'arc 2π dans des temps différents. On peut ramener l'un d'eux OA_1 au repos, et considérer que OA_2 décrit le cercle avec une vitesse

angulaire égale à sa vitesse relative par rapport à OA_1 (fig. 50).

Au moment précis où OA_2 passe en OA_1, fermons en

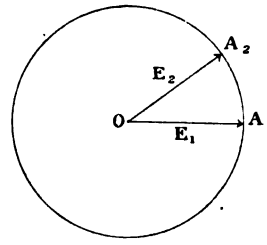

Fig. 50.

court-circuit les bornes de même polarité instantanée des deux alternateurs. Les forces électromotrices E_1, E_2 se trouveront alors en opposition, de telle sorte que, dans le circuit commun, leurs vecteurs respectifs OA_1 OA_2

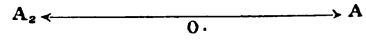

Fig. 51.

(fig. 51) seront orientés à 180° l'un de l'autre. Comme d'ailleurs nous avons $E_1 = E_2$ par hypothèse, le circuit ne sera, à cet instant, traversé par aucun courant.

Mais supposons que l'inducteur de (A_1) se trouvant soumis à un couple mécanique plus puissant que celui de (A_2), glisse d'un angle $\Delta\alpha$ en avant; en d'autres termes, supposons qu'au bout d'un temps quelconque les arcs décrits respectivement par chacun des inducteurs soient α_2 pour A_2, et $\alpha_2 + \Delta\alpha = \alpha_1$ pour A_1. Les forces électromotrices E_1, E_2 seront, à cet instant, décalées d'un angle θ, tel que :

$$\theta = \frac{N}{2} \Delta\alpha .$$

N étant le nombre total de pôles inducteurs, et le cir-

cuit commun se trouvera dès lors être le siège d'une force électromotrice e, figurée par le vecteur OB ou $A'_2 A_1$ (fig. 52). Les constantes de ce circuit étant $2r$ et $2l$ (r résistance ohmique, l coefficient de self-induction de chacun des induits), le courant auquel e donne nais-

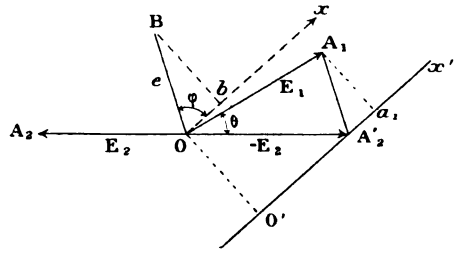

Fig. 52.

sance aura une direction Ox définie par l'angle φ de retard par rapport à OB, tel que :

$$\operatorname{tg} \varphi = \omega \frac{2l}{2r} = \omega \frac{l}{r}.$$

Projetant B en b, on aura :

$$Ob = 2ri.$$

L'angle φ est d'ailleurs sensiblement égal à 90°, car, dans la plupart des alternateurs, la résistance ohmique de l'induit est pratiquement négligeable devant son coefficient de self-induction. Cela étant, pour toute valeur de θ comprise entre o et π, le travail du courant i sera positif pour l'alternateur (A_1), négatif pour l'alternateur (A_2) : ce qui montre que, *dans le cas spécial qui nous occupe*, l'alternateur en retard de phase fonctionne comme réceptrice.

112. Menons $A_2'x'$ parallèle à Ox, et projetons sur cette ligne les points O et A_1 en O' et a_1.

En désignant par W_1 et W_2 les puissances respectives des deux alternateurs à l'instant considéré, on aura :

$$W_1 = O'a_1 \times i = O'a_1 \times \frac{A'_2 a_1}{2r} = \text{puissance produite},$$

$$W_2 = O'A'_2 \times i = O'A'_2 \times \frac{A'_2 a_1}{2r} = \text{puissance absorbée}.$$

La différence $W_1 - W_2$ représente le travail dissipé par effet Joule dans le circuit commun constitué par les deux induits en série, les câbles de connexion étant admis posséder une résistance négligeable. On a, en effet :

$$W_1 - W_2 = i \times (O'a_1 - O'A'_2) = i \times A'_2 a_1 = 2ri^2.$$

Pour chaque valeur θ du décalage déterminant une intensité i, la puissance totale mise en jeu sera proportionnelle à la longueur $O'a_1$; la puissance motrice transmise, à $O'A'_2$ (abstraction faite des pertes par hystérésis et courants de Foucault), et la puissance dissipée en chaleur par effet Joule, à la longueur $A'_2 a_1$. C'est à cette production de chaleur que se réduit la dépense de travail dans le système constitué par les deux alternateurs : elle est égale au travail de la force électromotrice résultante dans le circuit comprenant les deux induits.

Variations de la puissance transmise en fonction de l'angle θ. — 113. La puissance transmise, ou *puissance synchronisante*, est donc égale à W_2, soit, d'une manière générale, à :

$$E_2\, i \cos \widehat{(E_2, i)}.$$

On peut considérer que l'intensité i du courant dû à la force électromotrice e, résultante de E_1 et de E_2, est

la somme géométrique des intensités i_1 et i_2 que produiraient dans le même circuit, de constantes $2r$ et $2l$, chacune des forces électromotrices E_1 et E_2 agissant séparément, et écrire :

$$i \cos (\widehat{E_2, i}) = i_1 \cos (\widehat{E_2, i_1}) + i_2 \cos (\widehat{E_2\, i_2}).$$

On a d'ailleurs :

$$(\widehat{E_2, i_2}) = \varphi,$$
$$(\widehat{E_2, i_1}) = \varphi + \theta.$$

Mais nous avons admis que φ était assez voisin de $\frac{\pi}{2}$ pour que l'on puisse pratiquement lui attribuer cette valeur. On aura donc, comme expression de la puissance W_2 en valeur absolue :

$$W_2 = E_2\, i_1 \sin \theta$$

soit, comme :

$$i_1 = \frac{E_1}{2\omega l} \text{ (puisque } r \text{ est négligeable)}$$
$$W_2 = \frac{E_1 E_2}{2\omega l} \sin \theta = k \sin \theta.$$

La puissance transmise augmente donc lorsque θ varie de o à $\frac{\pi}{2}$; elle est maxima pour $\theta = \frac{\pi}{2}$, puis décroît et devient nulle pour $\theta = \pi$. Les forces électromotrices E_1, E_2 sont alors en coïncidence de phases dans le circuit commun, c'est-à-dire que les deux alternateurs se trouvent couplés en tension. Le courant i se bornant alors à échauffer les induits sans produire de couple qui tende à modifier le calage actuel, l'équilibre peut exister à un

instant donné ; mais il est instable, car tout écart de phases, si faible qu'il soit à l'origine, tendra à ramener les forces électromotrices en opposition dans le circuit.

Le fonctionnement de deux alternateurs couplés en tension ne saurait donc subsister d'une manière permanente, ce qui exclut la possibilité de réaliser pratiquement ce couplage (sauf emploi d'artifices spéciaux).

Le couple synchronisant qui correspond à la puissance W_2 étant maximum pour $\theta = \frac{\pi}{2}$, si le couple antagoniste qui produit le décalage possède une valeur supérieure à celle de ce maximum, la marche au synchronisme sera évidemment impossible. Le glissement relatif des deux inducteurs sera dès lors continu, et les forces électromotrices E_1, E_2 se présenteront alternativement en opposition et en tension dans le circuit commun.

Cas général. — 114. Dans le cas général, les deux

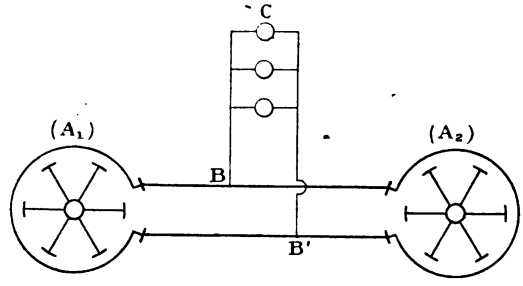

Fig. 53.

alternateurs alimentent simultanément un ou plusieurs circuits, tels que BCB' (fig. 53), desservant les lampes et les divers appareils récepteurs, et entre les bornes B, B' duquel est maintenue une différence de potentiel V, qui sera représentée par le vecteur OB, différence géométrique entre chacune des forces électromotrices $OA_1 = E_1$,

$OA_2 = E_2$ et les pertes de charge A_1 B, A_2 B dans les induits correspondants (fig. 54).

Le fait de shunter le circuit de couplage par un autre pris en dérivation sur ses bornes ne modifie pas, en principe, la donnée fondamentale qui a servi de base à

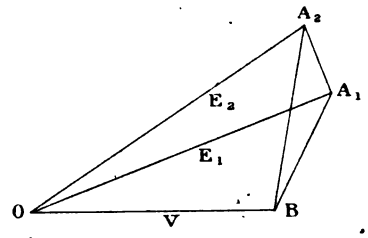

Fig. 54.

l'étude précédente; on est toujours en droit de considérer que la force électromotrice A_1A_2, différence géométrique des deux forces électromotrices E_1 et E_2 en présence dans le circuit de couplage détermine dans ce circuit, et quelles que soient d'ailleurs les autres forces électromotrices dont il puisse être le siège, la production d'un courant d'intensité égale au quotient de cette force électromotrice par l'impédance du circuit.

115. Mais ce courant, que l'on appelle *courant de circulation*, n'a plus, à proprement parler, d'existence effective dans le cas actuel : car on peut, de la même manière, considérer que les forces électromotrices A_1 B et A_2B, différences géométriques entre chacune des précédentes et la différence de potentiel V aux bornes du réseau, engendrent dans chaque partie $B(A_1)B'$, $B(A_2)B'$ du circuit de couplage des courants dont chacun se compose avec le courant de circulation pour donner comme courants résultants ceux dont les induits sont effectivement les sièges, et dont les intensités I_1, I_2 seront mesurées par les ampèremètres de chaque alternateur.

116. Les puissances :

$$W_1 = E_1 I_1 \cos \widehat{(E_1 I_1)}$$
$$W_2 = E_2 I_2 \cos (E_2 I_2)$$

effectivement développées par chaque machine seront, dans le cas général où l'une et l'autre concourent à la production du travail électrique absorbé par le réseau, toutes deux positives ; nous ne retrouvons donc plus ici le transport de force en quoi consistait la synchronisation dans le cas précédent. Cependant, le régime est encore stable, parce que — ainsi que nous le verrons plus loin, le travail électrique fourni par chaque alternateur, et par suite le couple résistant qui tend à retarder sa phase, varie dans le même sens que son angle de décalage en avant.

Nous verrons, en outre, que si le décalage des forces électromotrices E_1 et E_2 dépasse une certaine limite, l'alternateur en retard fonctionnera encore en réceptrice ; d'où il résulte que l'on peut considérer que la présence du circuit extérieur ne fait que retarder l'instant où la machine la plus puissante entraînera l'autre en lui fournissant la puissance nécessaire pour la maintenir en synchronisme.

117. Toutes choses égales d'ailleurs, l'efficacité des actions qui tendent à maintenir le synchronisme sera évidemment subordonnée à l'importance relative du couple antagoniste tendant à le détruire. En général, ce dernier couple dépend de la puissance du moteur, de l'uniformité plus ou moins grande du mouvement : soit plus spécialement de l'ensemble des conditions motrices, tandis que le couple synchronisant est, pour un décalage donné, déterminé en grandeur par les conditions électriques auxquelles satisfait la construction de l'alternateur. Ces dernières, dont l'ensemble détermine ce que l'on peut

appeler le degré d'aptitude au couplage, peuvent varier très notablement d'un type de machine à un autre ; de telle sorte que certains alternateurs donnent une marche en parallèle irréprochable, tandis que d'autres ne peuvent pratiquement pas être employés de cette manière.

L'étude détaillée des conditions (1) à remplir dans ce but ne saurait entrer dans le cadre de cet ouvrage ; aussi bien, la question intéresse-t-elle plutôt le constructeur que l'exploitant. Nous admettrons que les alternateurs considérés par la suite possèdent l'aptitude au couplage suffisante pour que leur emploi en parallèle soit pratiquement possible, et nous nous bornerons à déterminer les rôles que peuvent respectivement jouer les organes de régulation dont on dispose dans une usine centrale en vue de la réalisation des conditions de marche les plus favorables, ainsi qu'à rechercher quelles indications peuvent donner, dans ce sens, les appareils de mesure adjoints à chaque unité.

Diagramme du couplage en parallèle (2). — 118. Le seul cas intéressant, au point de vue pratique, est celui où la différence de potentiel est maintenue constante aux bornes du réseau de distribution.

Soient :

V cette différence de potentiel ;

R la résistance ohmique du circuit extérieur constitué par le réseau de distribution et les appareils récepteurs ;

L son coefficient de self-induction ;

---

(1) Consulter à ce sujet les articles de M. BLONDEL parus dans l'*Éclairage électrique* (1892-93), t. LXV, p. 351, 415, 465, 557, 615 ; t. LXVI, p. 151, 308, 360, 409, 456 ; t. LXVII, 34, 85.

(2) Le principe d'établissement de ce diagramme m'a été indiqué par M. GUILBERT (Voir *Éclairage électrique*, du 2 septembre 1899.

φ l'angle de décalage par rapport à V du courant dans le réseau, angle déterminé par la relation :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

Menons (fig. 55) OB = V ; OC faisant avec OB l'angle φ

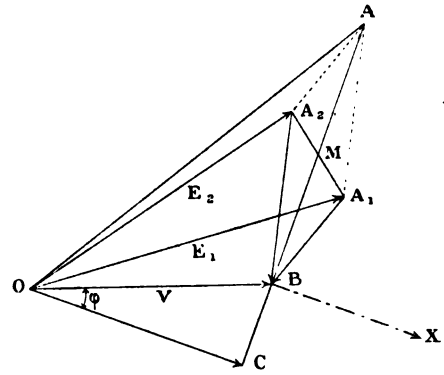

Fig. 55.

de retard, et BC perpendiculaire à OC. En désignant par I l'intensité du courant dans le réseau, nous aurons :

$$OC = RI$$
$$BC = \omega LI.$$

119. Supposons tout d'abord le réseau alimenté par un seul alternateur ; soit l le coefficient de self-induction de son induit : nous admettrons que la résistance ohmique est pratiquement négligeable, et que le coefficient l peut être considéré comme constant.

Si l'on prolonge la droite CB de la longueur BA = $\omega l I$ représentant la perte de charge dans l'induit, la force électromotrice induite E de l'alternateur sera figurée par le vecteur OA.

L'intensité I peut elle-même être mesurée par la longueur AB = $\omega l I$, et le calage du courant est à 90° en

avant de la direction AB, c'est-à-dire suivant BX parallèle à OC.

120. Si maintenant on vient à répartir d'une manière quelconque la charge totale entre les deux alternateurs, la somme géométrique des intensités I_1 et I_2 débitées par chacun d'eux devra, dans tous les cas, être égale à l'intensité I dans le réseau. En effet, chacune de ces intensités est elle-même la somme géométrique de l'intensité fournie au réseau, et de celle du courant de circulation dans le circuit de couplage. Ce courant étant le même dans les deux induits, et ceux-ci étant identiques, les pertes de charge qu'il occasionne dans chacun d'eux auront même valeur numérique. Mesurées par rapport au circuit de couplage, dans lequel les forces électromotrices E_1, E_2 se présentent en opposition, ces pertes de charge coïncident en phase ; par rapport au circuit extérieur, dans lequel E_1, E_2 sont concourantes, elles seront donc décalées de 180°. Il en sera de même des intensités correspondantes, dont la somme géométrique se réduira par suite à o. Donc, quelle que soit l'importance du courant de circulation, le courant total passant au réseau sera toujours égal à la somme géométrique des courants dans chacun des induits.

Il en résulte que si l'on représente par AB ce courant total, les courants I_1, I_2 seront, dans le cas général, figurés par des composantes telles que A_1B, A_2B (fig. 55) du vecteur AB; les forces électromotrices, E_1, E_2 étant alors respectivement représentées par les vecteurs OA_1, OA_2.

121. La figure AA_1BA_2 étant ainsi un parallélogramme, on voit immédiatement que l'une quelconque de ces forces électromotrices sera déterminée dès qu'on connaîtra l'autre en grandeur et en calage. En effet, ayant tracé le vecteur OA_1, il suffira, pour obtenir OA_2, de joindre A_1 au point M milieu de la diagonale AB, et de prolonger A_1M de la longueur égale MA_2. D'une manière

générale, lorsque le point A_1 se déplace dans le plan, le lieu du point A_2 sera la figure homothétique, par rapport au point M, de celle décrite par A_2; le rapport d'homothétie étant égal à l'unité.

Le diagramme permet donc de définir *à priori* les conditions de fonctionnement de l'un des alternateurs, connaissant l'intensité I_1 débitée par l'autre, et sa force électromotrice induite E_1 donnée, en fonction des ampères d'excitation, par la caractéristique. Le triangle OA_1B est en effet déterminé par ses trois côtés $OB = V$, $OA_1, = E_1$, $A_1B = \omega l I_1$, et la construction précédente donnera $OA_2 = E_2$, et $A_2B = \omega l I_2$.

Puissances. — 1° *Puissance totale fournie au réseau.* — 122. En désignant par E la force électromotrice induite nécessaire à l'un ou à l'autre des alternateurs pour fournir à lui seul la totalité de la puissance exigée par le réseau, on aura :

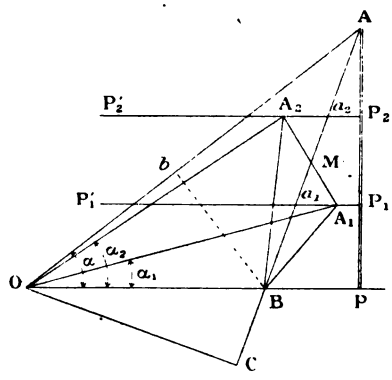

Fig. 56.

$$W_t = EI \cos \widehat{(EI)}.$$

Sur le diagramme (fig. 56), le vecteur OA représente la force électromotrice E en grandeur et en calage ; l'intensité I est figurée, en grandeur par AB (à l'échelle ωl fois plus grande que celle des forces électromotrices), et en calage par la direction BX, faisant avec AB un angle d'avance égal à 90°. On a donc :

$$W_t = OA \times \frac{AB}{\omega l} \sin OAB$$

Projetant le point B en b sur OA :

$$Bb = AB \sin OAB,$$

d'où :

$$W_t = OA \times \frac{Bb}{\omega l}.$$

D'autre part :

$$Bb = V \sin \alpha,$$

donc :

$$W_t = E \frac{V}{\omega l} \sin \alpha.$$

Abaissons du point A la perpendiculaire AP sur OB ; nous aurons :

$$AP = E \sin \alpha,$$

d'où :

$$W = \frac{V}{\omega l} \times AP.$$

On voit donc que la longueur AP représente, au facteur constant $\frac{V}{\omega l}$ près, la puissance totale absorbée par le réseau.

2° *Puissance fournie par chaque alternateur.* — 123. En projetant le point B sur $OA_1 = E_1$ et sur $OA_2 = E_2$, on démontrerait de la même manière que l'on a :

$$W_1 = E_1 I_1 \cos (\widehat{E_1, I_1}) = \frac{V}{\omega l} \times PP_1 = \frac{V}{\omega l} \cdot E_1 \sin \alpha_1$$

et :

$$W_2 = E_2 I_2 \cos (\widehat{E_2 I_2}) = \frac{V}{\omega l} \times PP_2 = \frac{V}{\omega l} \cdot E_2 \sin \alpha_2.$$

Comme d'ailleurs :

Projection de BA_1, + *Projection de* (BA_2 ou A_1A) = *Projection de* BA.

on vérifie bien que :

$$W_1 + W_2 = W_t.$$

124. Les quantités W_1 et W_2 ainsi définies mesurent les puissances effectivement développées par chaque alternateur : c'est-à-dire les puissances fournies par leurs moteurs respectifs, aux pertes par actions parasites près. Comme d'ailleurs celles-ci peuvent être considérées comme sensiblement constantes entre les limites ordinaires du fonctionnement, on voit que les segments PP_1, PP_2 pourront, à une échelle convenable, mesurer les puissances motrices relatives à chacune des deux unités en parallèle. On en déduit que :

Lorsqu'on fait varier les excitations de manière à maintenir V constant, les puissances motrices conservant d'autre part des valeurs W_1 *et* W_2 *invariables, les lieux des points* A_1, A_2 *seront les deux droites* $P_1P'_1$, $P_2P'_2$ *parallèles à* OB.

125. On peut se demander s'il est permis d'admettre que les puissances W_1 et W_2 puissent demeurer constantes lorsqu'on fait varier E_1 et E_2, c'est-à-dire les excitations des deux inducteurs. On sait en effet que, lorsqu'il s'agit de dynamos à courant continu couplées en parallèle, les conditions de puissance relatives à chaque unité sont régies, entre les limites de la puissance que peut fournir le moteur, par l'excitation du champ inducteur : de telle sorte qu'une simple manœuvre des rhéostats de champ permet de faire varier au cours de la marche la répartition des charges, depuis o jusqu'au maximum, sur les diverses unités. Il n'en est plus ainsi lorsqu'on opère sur des alternateurs au couplage : dans ce cas, et c'est là un point très caractéristique de la marche

en parallèle, la *puissance développée par chaque alternateur demeure très sensiblement indépendante des variations que l'on peut faire subir au taux d'excitation de ses inducteurs*, tant que le synchronisme subsiste, et que la puissance totale absorbée par le réseau demeure constante.

Ceci résulte de ce que le fonctionnement des régulateurs automatiques actuellement en usage sur les machines motrices est basé sur l'effet d'une variation de vitesse. Dans le cas du courant continu, chacune des machines motrices possède une vitesse individuelle variable de l'une à l'autre dans des limites indéfinies. Elle est donc libre d'obéir à l'action du rhéostat de champ, en ce sens que, sa vitesse diminuant lorsqu'on augmente l'excitation, et inversement, le régulateur automatique peut entrer en jeu, et mettre immédiatement la puissance motrice en rapport avec la demande de travail électrique.

Au contraire, un alternateur au couplage ne possède pas un état de vitesse qui lui soit propre et qui par suite puisse varier lorsqu'on modifie ses conditions électriques. L'état général de vitesse imposé par le synchronisme à tous les alternateurs en parallèle ne peut varier qu'en fonction du travail électrique total imposé à leur ensemble par les conditions du circuit extérieur [1]. La manœuvre des rhéostats d'excitation, tant qu'elle sera opérée de manière à maintenir constante la différence de potentiel aux bornes du réseau, n'exercera par suite aucune action de nature à modifier l'état de vitesse existante, et les régulateurs automatiques ne pouvant de ce fait entrer en jeu, les couples moteurs conserveront sur chaque unité les valeurs qu'ils possédaient précédemment ; il en sera

(1) Le travail synchronisant total est évidemment nul ; seule, la quantité de chaleur produite dans les induits peut varier avec l'intensité du courant de circulation, mais elle ne représente qu'une fraction généralement négligeable de la puissance totale mise en jeu.

par suite de même pour les puissances effectives des alternateurs.

126. Il résulte de ces conditions spéciales que si l'on fait varier les excitations des deux alternateurs considérés, les intensités I_1, I_2 figurées sur le diagramme (fig. 56) par les vecteurs A_1B, A_2B suivront une loi de variation telle, que les points A_1 A_2 décrivent respectivement les droites d'*égale puissance* $P_1P'_1$, $P_2P'_2$.

La somme arithmétique $A_1B + A_2B$ de ces intensités sera minima lorsque les points A_1A_2 coïncideront avec les intersections a_1,a_2 des droites $P_1P'_1$, $P_2P'_2$ avec la droite AB. L'échauffement total des deux induits aura dès lors la plus petite valeur compatible avec les conditions de puissance actuelle.

Courant de circulation. — 127. Ainsi que nous l'avons mentionné précédemment, on peut d'une manière générale considérer que le circuit de couplage est, indépendamment de tout autre courant, le siège du courant engendré par la différence géométrique A_1A_2 des forces électromotrices OA_1, OA_2. A ce point de vue, ce courant, que nous avons appelé courant de circulation, sera le même pour un décalage donné des forces électromotrices E_1, E_2, que si le circuit extérieur n'existait pas.

Le vecteur A_1 A_2 représente dès lors la perte de charge total occasionnée par ce courant dans les deux induits en série ; nous savons (§ 120) que les pertes de charges relatives à chacun de ces induits sont numériquement égales, et à 180° l'une de l'autre, de telle sorte qu'elles seront respectivement figurées par les vecteurs A_1 M, A_2 M.

Si l'on déduit géométriquement de $OA_1 = E_1$ et de $OA_2 = E_2$ les pertes de charge A_1 M, A_2 M, il restera, comme disponible pour la production du courant dans le circuit extérieur, la force électromotrice figurée par le vecteur OM. Il s'ensuit que l'un et l'autre alternateur

pourra être considéré comme débitant sur le réseau de l'intensité mesurée par MB, c'est-à-dire la moitié de l'intensité totale.

Les intensités effectives dans les induits, A_1 B et A_2 B, seront donc les sommes géométriques des intensités figurées par A_1 M et MB, pour le premier, A_2 M et MB, pour le second. Le courant de circulation est, à la même échelle, représenté par A_1 M = A_2 M.

128. Mais on peut considérer la question à un autre point de vue mieux approprié au but spécial de cette étude.

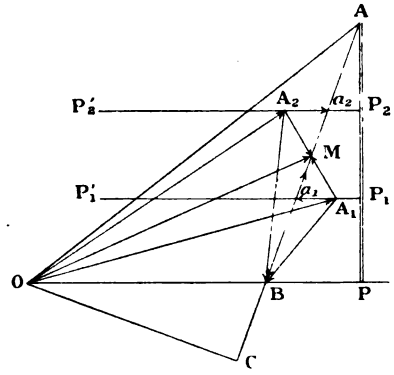

Fig. 57.

Remarquons que le courant de circulation A_1 M peut être décomposé suivant A_1 a_1 et a_1 M (fig. 57). Cette dernière composante, calée à 180° de la direction MB, se retranche par suite arithmétiquement du courant MB : et il reste, *comme courant utilisé à l'extérieur, ou courant utile proprement dit, la composante* a_1 B, *et comme courant de circulation, la composante* A_1 a_1 *du courant* A_1 B *dans l'induit.*

De même, les deux composantes a_2 B et A_2 a_2 du courant A_2 B dans l'induit du second alternateur définiront, la première, le courant utile fourni au réseau ; la seconde, le courant de circulation.

Les courants figurés par $A_1 a_1$, $A_2 a_2$ ont même intensité, et leurs calages respectifs sont l'un et l'autre à 90° de la différence de potentiel aux bornes du réseau.

Remarquons en outre que, si l'on compose les deux vecteurs OA_1 et A_1a_1 d'une part, OA_2 et A_2a_2 de l'autre, on obtient, comme forces électromotrices induites résultantes, $Oa_1 < OA_1$ pour la machine en retard, $Oa_2 < OA_2$, pour la machine en avance de phase : ce qui montre que le courant de circulation renforce l'excitation de la machine en avance, diminue celle de la machine en retard de phase (1).

129. *Le courant de circulation se réduit à* 0, *quel que soit d'ailleurs le décalage des forces électromotrices* E_1E_2, *lorsque les points* A_1, A_2 *se trouvent sur le segment de droite* AB. Dans ce cas, en effet, la composante A_1a_1 de ce courant est nulle ; la composante dirigée suivant BA est annulée par le courant passant au réseau.

130. Le diagramme montre que le courant dans l'induit de l'un des alternateurs est nul, lorsque sa force électromotrice induite coïncide avec OB, différence de potentiel aux bornes du réseau. Dans ce cas, en effet, la force électromotrice induite du second alternateur coïncide avec OA ; le courant de circulation dans l'induit de l'alternateur considéré est par suite BM numériquement égal et de calage opposé au courant MB qu'il tendrait à fournir au réseau : ces deux courants s'annulent donc réciproquement.

131. Lorsque les points A_1, A_2 tombent en dehors du segment BA, la composante suivant BA du courant de circulation dans l'alternateur en retard de phase dépasse la valeur MB, c'est-à-dire que cet alternateur ne fournit plus de courant au réseau ; il en emprunte, pour se main-

(1) Cet effet caractéristique du courant de circulation m'a été indiqué par M. GUILBERT.

tenir au synchronisme, à l'alternateur en avance qui se trouve dès lors développer une puissance supérieure à la puissance totale absorbée par le réseau. Le segment $AP_2 = PP_1$ (fig. 58) mesure la puissance transmise de

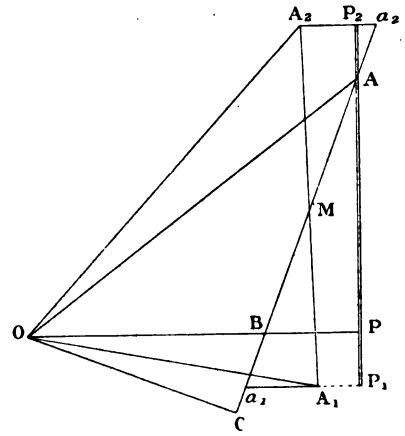

Fig. 58.

l'alternateur (A_2) à l'alternateur (A_1), qui fonctionne par suite en réceptrice.

On voit ainsi que la marche en réceptrice de l'un des alternateurs, au lieu de se produire dès qu'il existe un retard de phase, si faible fût-il, ainsi que cela avait lieu dans le cas de la marche à vide, exige dans le cas actuel un décalage supérieur à l'angle BOA déterminé par les constantes du circuit extérieur et celles des induits.

Si ces constantes sont telles que l'angle BOA soit inférieur à l'angle de *décrochage* (c'est-à-dire à la valeur limite que puisse atteindre le décalage A_1OA_2 des forces électromotrices induites sans que le synchronisme soit rompu), la marche au synchronisme sera assurée d'une manière certaine, car la machine en avance finira, si l'écart des phases s'accroît suffisamment, par entraîner l'autre, exactement comme dans le cas de la marche à

vide. C'est en cela que consiste la condition de stabilité indiquée par M. Blondel.

Stabilité en régime normal; courant synchronisant.— 132. Avant que cette limite ne fût atteinte, le régime était stable par ce fait que *toute avance angulaire déterminait un accroissement de puissance, et inversement.*

L'expression de la puissance développée par un alternateur est, ainsi que nous l'avons vu :

$$W = E \frac{V}{\omega l} \sin \alpha.$$

Le diagramme montre que la valeur maxima que puisse prendre α pour l'un des alternateurs avant que le second ne fonctionne en réceptrice, est l'angle BOA (fig. 58). Cet angle est forcément inférieur à 90°, tout au moins tant que le courant sur le réseau sera décalé en arrière de la différence de potentiel aux bornes V, ce qui est le cas général. Il en résulte que la puissance fournie au réseau, et par suite le couple résistant tendant à limiter le décalage, iront en croissant avec l'angle d'avance α, ce qui justifie l'énoncé ci-dessus.

D'autre part, les diagrammes précédents (fig. 56 et 57) montrent que pour une puissance donnée PP_1, l'avance de phase α_1 de l'alternateur sur la différence de potentiel V variera en sens inverse de son excitation : car si l'on augmente celle-ci, et par suite la force électromotrice induite OA_1, le point A_1 se déplacera dans le sens $P_1'P_1$, et inversement. Or, ainsi que nous l'avons mentionné au paragraphe 128, l'effet du courant de circulation est d'accroître le champ inducteur de la machine en avance, de diminuer celui de la machine en retard de phase ; ces deux actions concourent donc à ramener les alternateurs en coïncidence de phase.

C'est en cela que consiste l'*action synchronisante* du courant de circulation.

On peut se figurer le mécanisme de cette action en substituant par la pensée aux composantes $A_1\ a_1$, $A_2\ a_2$ (fig. 57) deux ressorts dont la tension, croissant avec l'écart de phase A_1OA_2, solliciterait constamment les points A_1A_2 à venir coïncider avec les points fixes $a_1\ a_2$.

Détermination pratique des éléments du diagramme. — 133. Rappelons que, OB mesurant à l'échelle des forces électromotrices la différence de potentiel V aux bornes du réseau : OA_1, OA_2 représentent en grandeur et en calage les forces électromotrices induites E_1, E_2 des deux alternateurs ; A_1B, A_2B les pertes de charge $\omega l I_1$, $\omega l I_2$ dans les deux induits ; OC la perte de charge ohmique RI dans le circuit extérieur, et CB la perte de charge inductive dans le même circuit.

A l'échelle des intensités, échelle ωl fois plus grande que la précédente, A_1B, A_2B mesurent les intensités I_1, I_2, effectivement débitées par chaque alternateur ; les calages de ces courants sont à 90° en avant des directions A_1B, A_2B.

Enfin, à l'échelle des puissances, $\frac{\omega l}{V}$ fois plus grande que la première, PP_1 et PP_2 mesurent les puissances respectivement développées par chaque alternateur ; la puissance totale fournie au réseau est mesurée par $PA = PP_1 + PP_2$.

134. La longueur $OB = V$ est donnée directement par la lecture du voltmètre en dérivation sur les bornes de départ du tableau ; les ampèremètres des deux machines donneront respectivement $I_1 = \frac{A_1B}{\omega l}$ et $I_2 = \frac{A_2B}{\omega l}$; enfin, les longueurs OA_1 et OA_2 seront déduites des caractéristiques, en fonction des intensités d'excitation indiquées par les ampèremètres en circuit sur chacun des inducteurs.

On pourra donc construire les deux triangles OA_1B, OA_2B. Menant BA, diagonale du parallèlogramme construit sur BA_1 et BA_2, et abaissant sur son prolongement la perpendiculaire OC, on obtiendra sur l'épure l'angle de décalage φ du courant dans le réseau par rapport à V, ainsi que les constantes R et L du circuit extérieur. On a en effet :

$$OC = RI = R \times \frac{AB}{\omega l},$$

$$BC = \omega LI = AB \times \frac{L}{l}.$$

En complétant le diagramme comme l'indique la figure 56, on obtiendra les puissances développées par chaque alternateur, ainsi que l'intensité $A_1 a_1 = A_2 a_2$ du courant de circulation.

135. On peut encore établir le diagramme en procédant d'une autre manière. On construit des wattmètres à indications permanentes (1), dont l'emploi peut rendre de très grands services, notamment pour la conduite de la marche en parallèle. Si l'on dispose de trois de ces appareils établis respectivement sur le circuit total et sur chacun des alternateurs, le premier donnera, par comparaison avec l'ampèremètre établi sur le même circuit, l'angle φ, ce qui permettra de construire le triangle OBC. Connaissant d'autre part $BA = \omega l I$, on abaissera du point A la perpendiculaire AP sur OB, on prendra sur cette droite les segments PP_1, PP_2 proportionnels aux indications W_1 et W_2 des deux autres wattmètres, et les points A_1, A_2 seront déterminés par les intersections des arcs de cercles décrits du point B comme centre, et

(1) Wattmètres de lord KELVIN, construits par James White, à Glascow.

ayant pour rayons $\omega l I_1$, $\omega l I_2$ avec les parallèles à PO menées des points P_1 P_2.

Le diagramme sera donc déterminé sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir comme données les forces électromotrices E_1, E_2 induites à circuit ouvert, lesquelles peuvent, dans le cas général, n'être pas très bien définies, pour les raisons qui ont été exposées plus haut.

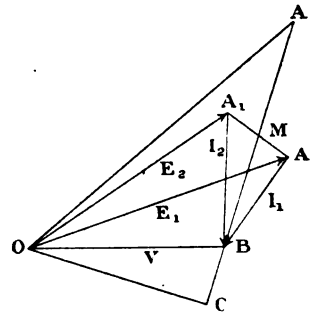

Fig. 59, I.

Suivant le cas, on obtiendra ainsi l'un ou l'autre des trois diagrammes-types I, II ou III (fig. 59), définissant des conditions de marche telles que :

1° Dans le premier cas, les intensités des courants

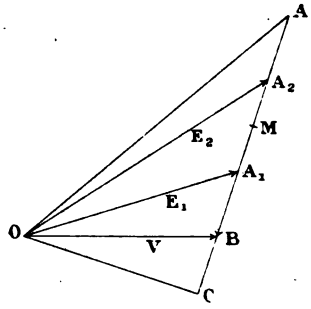

Fig. 59, II.

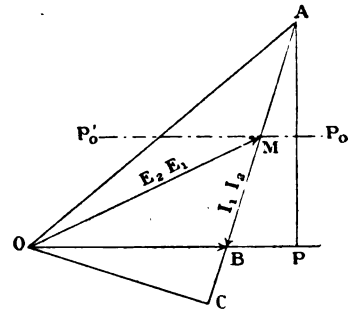

Fig. 59, III.

débités par chacun des alternateurs diffèrent en phase et en valeur numérique ;

2° Dans le second, les intensités coïncident en phase ; leurs valeurs numériques sont différentes ;

3° Dans le troisième, les intensités coïncident en grandeur et en phase, ainsi que les forces électromotrices induites.

Nous allons maintenant examiner quelles indications pratiques peut fournir cette méthode, pour la conduite des alternateurs en parallèle.

Conduite des alternateurs en parallèle ; couplage et découplage. — 136. Dans le cas général qui correspond aux conditions du diagramme I (fig. 59), les composantes A_1a_1, A_2a_2 représentent un courant qui échauffe les induits sans produire de travail utilisable, puisqu'il est décalé de 90° par rapport à la différence de potentiel aux bornes des alternateurs. Il y a donc intérêt à le réduire au minimun, et à l'annuler si possible.

La seule manœuvre des rhéostats d'excitation permet d'obtenir ce résultat : car nous savons qu'elle a pour effet de déplacer les points A_1, A_2 le long des droites d'égale puissance $P_1P'_1$, $P_2P'_2$. On pourra donc, par un réglage convenable des excitations, amener ces points en a_1 et a_2.

Pratiquement, on sera guidé dans la manœuvre par cette considération que *la somme arithmétique des intensités* I_1 *et* I_2, *lues sur les ampèremètres, doit constamment décroître jusqu'à un minimum* dont la valeur est celle de l'intensité dans le circuit extérieur. On procédera donc par tâtonnements successifs, jusqu'à ce que l'on ait réussi à attribuer à cette somme la plus faible valeur possible, et l'on se trouvera dès lors dans les conditions du diagramme II.

137. Mais, bien que ces conditions soient évidemment préférables aux précédentes, elles laissent toutefois à désirer au point de vue de l'utilisation complète du matériel : car, tant que les puissances développées par les alternateurs seront différentes, ils ne pourront fournir la puissance totale correspondant à la somme de leurs charges-limites, l'une de ces charges étant forcément dépassée avant que l'autre ne soit atteinte. Le réglage normal au cours de la marche doit donc tendre à réaliser

cette double condition de répartir également la charge totale sur les deux machines, tout en réduisant à o le courant de circulation ; et le diagramme montre immédiatement que, pour qu'il en soit ainsi, la condition nécessaire et suffisante est que, *pour des excitations égales, les intensités* I_1, I_2 *lues sur les ampèremètres soient elles-mêmes égales*. C'est le cas du diagramme III. En effet, la condition d'égale puissance exige que les points A_1, A_2 se trouvent sur la même parallèle P_0 P'_0 à PO, laquelle passera dès lors par le point M milieu de AB ; d'autre part, pour que le courant de circulation soit nul, il faut qu'ils se confondent avec le point M.

On commencera donc par égaliser les intensités d'excitation ; puis on agira sur les organes de réglage mécanique, valves ou régulateurs de détente, de manière à égaliser exactement les intensités I_1 et I_2 débitées par chaque alternateur. Il pourra y avoir lieu d'opérer ce réglage plusieurs fois au cours d'une même période de marche, car les couples moteurs de deux machines semblables peuvent ne pas se maintenir égaux pour toutes les valeurs de la charge.

138. On voit donc que la conduite rationnelle de la marche exige, outre l'emploi du rhéostat d'excitation, celui d'un régulateur mécanique permettant de faire varier, *pour un état de vitesse donné et constant*, la puissance individuelle de chaque machine. Nous verrons par la suite que cette nécessité s'impose d'une manière plus stricte encore pour la mise en parallèle et le découplage de chaque alternateur ; malheureusement, elle ne paraît pas, jusqu'à ces dernières années tout au moins, avoir été prise en considération par les constructeurs : de telle sorte que la presque totalité des machines existantes ne comportent, comme organe pouvant permettre un réglage individuel, que la valve d'admission, sur laquelle on est dès lors forcé d'opérer pour graduer convenablement les

pressions dans les cylindres de l'une et de l'autre machine.

Dans certains cas, ce réglage pourra demeurer tout à fait impraticable, soit que la valve ne soit pas commodément placée, soit que son action soit trop brusque. Il faudra alors se résoudre à réaliser autant que possible les conditions du diagramme II au cours de la marche.

Pour déterminer dans quels sens les deux rhéostats devront être manœuvrés, on pourra tout d'abord amener les excitations à être égales. La machine la plus décalée en avant, c'est-à-dire celle sur laquelle agit le couple moteur le plus puissant, sera dans ce cas celle dont l'ampèremètre annonce la plus grande intensité : car, dans les triangles BOA_1, BOA_2 (fig. 59, I), les côtés OA_1 et OA_2 étant égaux et le côté OB commun, au plus grand angle α_2 sera opposé le plus grand côté $A_2B = \omega l\ I_2$ (1).

Ceci posé, pour satisfaire à la condition $E_2 > E_1$ correspondant à $W_2 > W_1$ dans le diagramme II, il faudra donc augmenter l'excitation *sur la machine qui, à excitations égales, débitait le plus*, et par suite la diminuer sur l'autre jusqu'à ce que la somme $I_1 + I_2$ passe par sa valeur minima, ainsi qu'il a été dit plus haut.

139. Notons, en passant, que l'on est porté naturellement à opérer le réglage inverse : c'est-à-dire, en vue d'égaliser les charges *apparentes*, à diminuer l'excitation sur la machine qui débite le plus, et inversement. Ceci peut notamment résulter d'habitudes prises dans la pratique du courant continu, habitudes auxquelles on obéit machinalement. On peut bien parvenir à égaliser, par la manœuvre des rhéostats, les intensités indiquées par l'un et l'autre ampèremètre : mais cette régulation est pure-

(1) Cette remarque trouve encore son application dans le cas du réglage mécanique : il faudra, pour la même raison, diminuer la puissance motrice de la machine débitant, à excitations égales, la plus grande intensité; et inversement.

ment illusoire. En effet, les conditions du diagramme II étant supposées remplies (fig. 60), les intensités A_1B, A_2B sont différentes. Si l'on veut les amener à une valeur

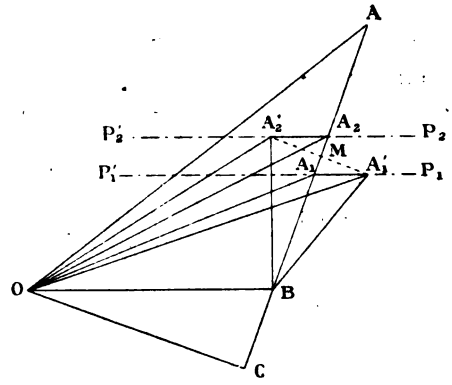

Fig. 60.

commune par le seul emploi des rhéostats, il faudra modifier les excitations de telle sorte que les points A_1 et A_2, étant, comme nous le savons, assujettis à suivre les droites $P_1P'_1$, $P_2P'_2$, viennent en A'_1, A'_2, intersections de ces droites avec la perpendiculaire élevée du point M sur AB ; c'est en effet la condition pour que le triangle $A'_1BA'_2$ soit isocèle.

On voit qu'en définitive cette manœuvre a conduit à créer un courant déwatté qui n'existait pas précédemment, et par suite à substituer à des conditions de fonctionnement relativement bonnes, d'autres beaucoup plus défectueuses. En fait, il n'y a aucun intérêt à chercher l'égalité des intensités, *lorsque sa réalisation exige des excitations différentes.*

Mise au couplage d'un alternateur. — 140. Pratiquement, la manœuvre qui consiste soit à coupler, soit à découpler un alternateur, doit être conduite de manière à n'occasionner aucune variation de voltage sur la ligne.

En particulier, lors du couplage, le nouvel alternateur ne devra, à l'instant où l'on vient le fermer sur le réseau, débiter ni recevoir aucun courant : car, dans le premier cas, il se produirait une élévation de voltage, et dans le second, il se produirait forcément une baisse.

Le diagramme montre que cette condition sera remplie, si la force électromotrice induite E_1 de cet alternateur coïncide exactement avec OB = V au moment de la fermeture. On devra donc : 1° exciter les inducteurs de manière que $E_1 = V$; 2° choisir l'instant où les phases sont en concordance exacte pour mettre l'alternateur en ligne. Cette deuxième condition est pratiquement réalisée au moyen de dispositifs spéciaux qui seront décrits plus loin.

141. Cela étant, l'induit de l'alternateur considéré ne sera, à l'*instant précis de la fermeture*, le siège d'aucun courant, puisque les forces électromotrices E_1 et V s'équilibrent exactement dans le circuit de couplage. Mais il cessera *immédiatement* d'en être ainsi, pour peu que l'alternateur tende alors à se décaler en avant ou en arrière de la direction OB : il faudra donc, outre les conditions ci-dessus, que la vitesse du nouvel alternateur ait été préalablement amenée à une valeur aussi voisine que possible de celle de l'alternateur déjà en ligne. Le moyen le plus simple pour atteindre ce résultat consiste évidemment à agir directement sur la puissance motrice de la machine en préparation, en se guidant, soit sur les indications des lampes de phases, soit sur des phénomènes optiques d'un ordre spécial, dont nous parlerons plus loin.

142. Le couplage ayant été réalisé dans les conditions ci-dessus, le nouvel alternateur ne débite rien sur la ligne. Pour l'amener dans les conditions normales de charge, il faudra combiner parallèlement l'action des rhéostats et celle des régulateurs de puissance de ma-

nière que les points A_1, A_2 se déplacent le long de la droite AB jusqu'à venir se confondre en M ; la charge totale se trouvant alors également répartie sur les deux alternateurs. En réalité, au cours de cette manœuvre, les trajectoires décrites par A_1 et A_2 seront deux courbes homothétiques plus ou moins sinueuses, comme l'indique la figure 61, car il est impossible de conduire l'opération de manière qu'à tout accroissement de puissance augmentant de $\Delta\alpha_1$ l'avance angulaire de $E_1 = OA_1$ par rapport à V, corresponde l'accroissement ΔE_1 exactement tel que le point A_1 se trouve toujours sur AB.

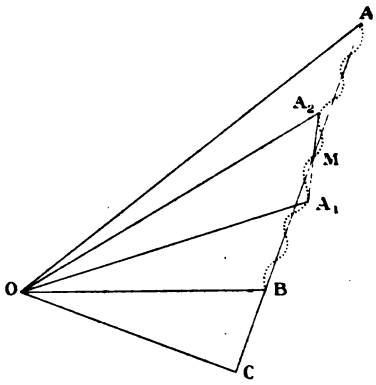

Fig. 61.

Ceci n'a d'ailleurs aucune importance : c'est seulement lorsque les deux alternateurs se trouveront dans des conditions de charge voisines, qu'il y aura lieu de compléter le réglage par l'égalisation des excitations et des débits.

Il est d'ailleurs inutile, au cours de la manœuvre, d'agir sur les puissances des deux moteurs ; il suffira en général d'accroître progressivement celle de la machine qui vient d'être mise au couplage. La charge totale n'ayant pas varié, l'introduction d'une nouvelle unité génératrice a pour effet d'accroître la vitesse au fur et à mesure qu'une partie de la charge passe de l'alternateur (A_2) à l'alternateur (A_1), d'où il résulte que le régulateur automatique de (A_2) agira pour réduire sa puissance motrice à mesure qu'augmente celle développée par (A_1). Quant aux rhéostats d'excitation, le diagramme montre que leur manœuvre doit être simultanée.

143. En résumé, l'opération du couplage doit être conduite à la fois par l'électricien et par le conducteur de la machine que l'on met en service, à moins d'un dispositif permettant de manœuvrer du tableau le régulateur de puissance.

Le procédé qui vient d'être décrit est d'ailleurs de beaucoup le plus simple, aussi est-il aujourd'hui à peu près universellement employé, à l'exclusion de méthodes théoriquement plus parfaites, mais dont la pratique a démontré les inconvénients.

144. *Méthode de Ganz.* — Parmi ces dernières, il y a lieu de mentionner celle de Ganz, qui a longtemps joui d'une grande vogue. Elle consiste à placer préalablement l'alternateur, que l'on se propose de coupler, dans des conditions de charge identique à celles des autres unités déjà en service. Il faut pour cela disposer d'un rhéostat, dit rhéostat de *charge*, capable d'absorber la puissance totale d'une unité génératrice ; ce rhéostat étant fractionné en un nombre quelconque de résistances égales, on vient successivement mettre ces résistances en dérivation sur les bornes de l'alternateur, jusqu'à ce que la charge voulue soit atteinte. On effectue alors le couplage, puis on met successivement hors circuit les résistances, ce qui revient à diminuer la charge totale imposée à l'ensemble des unités en parallèle, en maintenant le voltage constant aux bornes du réseau.

145. Au point de vue théorique, cette méthode est caractérisée par ce fait que les forces électromotrices induites E_1 et E_2 sont égales et en phase dès l'instant du couplage, et c'est évidemment un avantage. De plus, elle peut être opérée par l'électricien seul, puisque aucun réglage de puissance n'a lieu d'intervenir. Par contre, le rhéostat de charge est, dans le cas surtout d'unités puissantes, un appareil coûteux et encombrant, assez difficile à réaliser et à entretenir si la tension est élevée. En outre,

il peut arriver que l'on ait à faire un changement de machines au moment de la pleine charge, alors que les chaudières se trouvent dans les conditions de production limite, et il peut dans ce cas y avoir quelque inconvénient à leur imposer une surcharge, fût-ce même pendant un temps relativement court. Enfin, la présence d'un rhéostat de charge n'exclut pas la nécessité de disposer d'un régulateur de puissance qui permette d'égaliser les charges au cours de la marche en parallèle. En définitive, les avantages de la méthode paraissent, en pratique, compensés et au delà par ses inconvénients, et certaines usines centrales dont le matériel comportait un rhéostat de charge l'ont par la suite abandonné pour adopter le principe du réglage mécanique. Il n'est d'ailleurs pas impossible de commander ce réglage du tableau, au moyen d'un servo-moteur électrique actionnant soit la valve d'admission du moteur, soit ses organes de détente.

Découplage. — 146. Pour mettre hors circuit l'une des unités génératrices sans modifier la différence de potentiel aux bornes du réseau, il faut et il suffit qu'à l'instant du découplage la force électromotrice induite E_1 de l'unité considérée coïncide en grandeur et en phase avec cette différence de potentiel. Si l'on admet qu'au moment où l'on a commencé la manœuvre, les points A_1, A_2 coïncidaient en M — ainsi que cela doit avoir lieu — l'action simultanée des rhéostats et des régulateurs de puissance devra avoir pour effet de faire décrire à ces points les trajectoires respectives MB et MA (fig. 61), de telle sorte que la puissance développée par l'alternateur (A_1) devienne nulle, alors que la charge totale est prise par l'alternateur (A_2). Au moment de la mise hors circuit, l'ampèremètre de (A_1) doit être au o : c'est la condition nécessaire et suffisante pour que le point A_1 coïncide avec le point B.

147. Qu'arriverait-il si l'on cherchait à faire tomber à o l'intensité I_1 par la seule manœuvre des rhéostats d'excitation ? Le diagramme (fig. 62) montre que si l'on

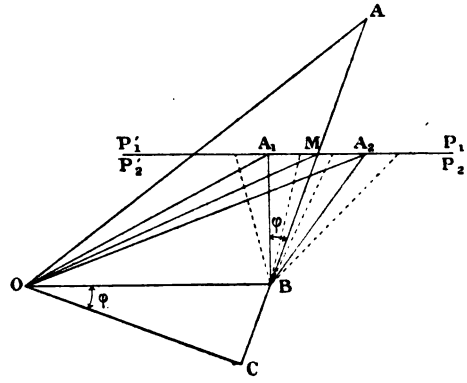

Fig. 62.

diminue progressivement l'excitation sur (A_1), l'intensité du courant débité par l'alternateur décroîtra d'abord jusqu'au minimum A_1B, pour lequel I_1 est en phase avec V, pour augmenter ensuite indéfiniment ; l'intensité I_2 croissant d'ailleurs d'une manière continue.

Ainsi, la seule manœuvre des rhéostats d'excitation ne permettra pas de faire décroître le débit de l'un des alternateurs au-dessous de la valeur pour laquelle son courant se trouve être en phase avec la différence de potentiel aux bornes du réseau.

Cette valeur est dans le cas où les puissances motrices des deux unités sont égales :

$$A_1B = MB \cos \varphi$$

soit :

$$I_{min} = \frac{I}{2} \cos \varphi.$$

Pour $\cos \varphi = 0{,}6$ (ce qui correspond à peu près aux

conditions de décalage maximum sur la plupart des réseaux), on voit qu'il sera impossible de diminuer de plus de 40 p. 100 l'intensité primitive.

Notons en passant que cette remarque fournit un moyen simple d'évaluer approximativement le décalage φ du courant dans le réseau. Ayant égaliser les débits et les excitations des deux alternateurs, on diminuera l'excitation de l'un d'eux jusqu'à ce que l'intensité de son courant passe par sa valeur minima, le voltage aux bornes du réseau étant d'ailleurs maintenu constant en augmentant l'excitation sur le second alternateur. On aura alors :

$$\cos \varphi = \frac{2 I_{min}}{I}.$$

Méthode de Ganz. — 148. On met l'alternateur que l'on se propose de découpler, en relation avec le rhéostat de charge, comprenant le nombre de dérivations nécessaires pour absorber une intensité de courant égale à celle que fournit cet alternateur au réseau. Tant que le découplage n'est pas opéré, ce courant sera fourni par l'ensemble des unités en parallèle. On sépare alors l'alternateur du circuit de couplage, ce qui ne modifie, ni ses conditions de débit initial, ni celles relatives à l'ensemble des autres unités en parallèle. Il n'y a plus alors qu'à désamorcer progressivement l'alternateur en le laissant, si l'on veut, sur le rhéostat.

Ce procédé présente les mêmes avantages et les mêmes inconvénients que le procédé analogue de couplage. Il est en outre d'une pratique plus difficile que le précédent.

CAS OU LE NOMBRE D'ALTERNATEURS EN PARALLÈLE EST QUELCONQUE

149. Les considérations développées au paragraphe 137 s'appliquent évidemment quel que soit le nom-

bre des alternateurs au couplage : *la meilleure condition de marche sera, dans tous les cas, réalisée lorsque tous les alternateurs débiteront la même intensité de courant, leurs excitations étant égales;* et l'on obtiendra ce résultat en opérant, autant de fois qu'il le faudra au cours d'une même période de marche, le réglage des puissances individuellement développées par les moteurs.

L'égalité des couples moteurs une fois établie peut en effet ne pas se maintenir à tous les régimes de charge. Abstraction faite de toute autre cause pouvant modifier les conditions relatives de fonctionnement mécanique, les régulateurs automatiques et les organes intermédiaires commandant les distributions ne seront pratiquement jamais assez identiques d'une machine à l'autre, pour que l'effet produit soit rigoureusement le même dans tous les cas de charge. Il peut en outre exister, soit dans les tiroirs ou obturateurs, soit au pourtour des pistons, des fuites modifiant, pour une admission donnée, la puissance du moteur. En définitive, quelque soin que l'on apporte au réglage *a priori* des organes régulateurs, il n'en demeure pas moins indispensable que l'on dispose d'un régulateur manœuvrable à la main pour corriger les écarts de puissance individuelle au cours de la marche ; cet appareil permettant en outre d'effectuer les couplages et découplages suivant la méthode exposée plus haut.

En somme, la condition de rendement et d'utilisation maxima sera réalisée de la même manière quel que soit le nombre des unités en service, et il n'y a pas lieu d'insister sur ce point.

150. *Stabilité.* — Par contre, les conditions de stabilité d'un alternateur donné se modifient suivant qu'il fonctionne en parallèle avec un seul ou plusieurs autres alternateurs semblables. Nous avons vu précédemment que, pour que le maintien du synchronisme soit assuré, il faut et il suffit que la machine en retard de phase arrive à

fonctionner en réceptrice avant que l'angle de décalage limite ne soit atteint (condition de M. Blondel). Dans le cas de deux altèrnateurs, leurs conditions respectives restent les mêmes, quel que soit le sens dans lequel l'un d'eux se décale par rapport à l'autre ; de telle sorte qu'il est, au point de vue de la stabilité de l'un d'eux considéré à part, tout à fait indifférent que la cause déterminant à un instant donné son décalage soit accélératrice ou retardatrice.

Il cesse d'en être ainsi dès qu'il y a plus de deux

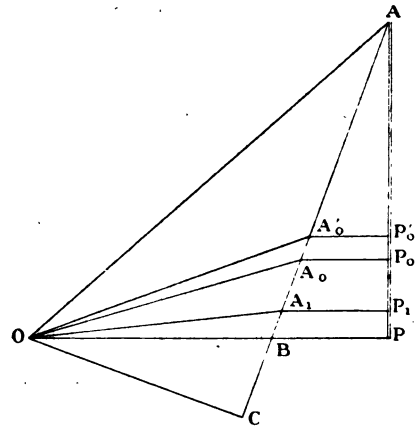

Fig. 63.

alternateurs en parallèle. Soit en effet PP_0 (fig. 63) la puissance individuelle développée par chaque unité lorsque leur ensemble satisfait à la condition d'égale répartition des charges, de telle sorte que $PP_0 = \frac{PA}{n}$.

Supposons que l'un des alternateurs vienne à se décaler en arrière de l'angle A_0OA_1 ; la puissance produite actuellement par lui sera dès lors PP_1. Le groupe des $n-1$ autres aura par suite à fournir un supplément de puissance mesuré par P_0P_1 : soit seulement $\frac{P_0P_1}{n-1} = P_0P'_0$

pour chaque unité du groupe ; de telle sorte que le décalage en avant de chacun des $n-1$ alternateurs sera mesuré par l'angle $A_0OA'_0$ déterminé par la projection A'_0 du point P'_0 sur AB, et tel que :

$$\sin A_0OA_0' = \frac{\sin A_1OA_0}{n-1}.$$

Par rapport au calage initial commun OA_0, le retard de l'un des alternateurs ira donc en croissant plus vite que l'avance des $n-1$ autres. Il en résulte que la marche en réceptrice de l'alternateur considéré exigera, pour se produire, un décalage moins grand dans le cas actuel, que dans celui précédemment étudié.

Par contre, si l'alternateur se décale en avant, la marche en réceptrice de l'ensemble des $n-1$ autres unités ne pourra généralement pas se produire : car, au retard que devront prendre ensemble ces $n-1$ alternateurs correspondra pour l'autre un angle d'avance tel que le décalage résultant excède en général de beaucoup la limite de stabilité.

151. D'une manière générale, soit (A_0) l'alternateur considéré isolément, et soit (A) le groupe des $n-1$ autres, auxquels on peut substituer un seul alternateur de puissance P, $n-1$ fois plus grande que celle P_0 de A_0, P et P_0 désignant des puissances maxima. On voit immédiatement que la condition de réversibilité qui existait précédemment entre les unités (A_1) et (A_2) identiques n'existe plus entre (A) et (A_0) : car si (A_0) emprunte à (A), pour fonctionner en réceptrice, une puissance négligeable vis-à-vis de la puissance maxima disponible P, par contre la puissance que devrait fournir (A_0) pour entraîner (A) dépassera en général la valeur (P_0).

152. En résumé, on voit que tandis que le décalage en arrière de l'un des alternateurs par rapport aux autres *ne saurait en général compromettre la stabilité de*

l'ensemble, et cela d'autant moins que le nombre total des unités en parallèle est plus grand, par contre, *le décalage en avant pourra amener hors de phase l'alternateur considéré.*

Tout le danger paraît donc devoir consister dans un excès de puissance de l'une des machines motrices. On peut encore mettre ce fait en évidence de la manière suivante :

152. Considérons le cas limite où le nombre n d'alternateurs en parallèle est assez grand pour que l'état de régime puisse être considéré comme sensiblement indépendant des variations de la puissance développée par l'un d'eux considéré à part. Soient : V la différence de potentiel constante aux bornes du réseau, E la force électromotrice induite de l'alternateur considéré, et α l'angle de décalage de E par rapport à V.

La puissance W développée par l'alternateur dans les

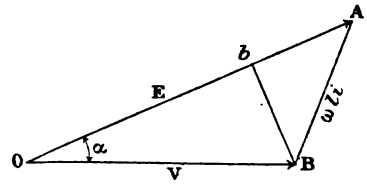

Fig. 64.

conditions de force électromotrice induite et de calage ci-dessus est, d'une manière générale, égale au produit :

$$W = EI \cos (EI),$$

soit, en menant $AB = \omega l I$ (fig. 64).

$$W = E \times \frac{AB}{\omega l} \sin A.$$

Projetant B en b sur OA, nous trouvons comme précédemment :

$$Bb = AB \sin A$$

d'où :

$$W = E \times \frac{Bl}{\omega l} = E \frac{V}{\omega l} \sin \alpha = KE \sin \alpha$$

Supposons qu'on laisse E constante.

En coordonnées polaires, cette équation est celle du cercle tangent en O à OB et ayant pour diamètre OD = KE. La puissance correspondant à chaque valeur du décalage α sera donc figurée par le vecteur OP (fig. 65).

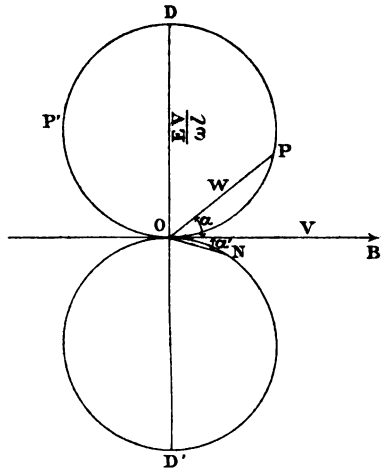

Fig. 65.

153. — On voit tout d'abord que le régime sera stable dans la région correspondant au demi-cercle OPD, car à tout accroissement de décalage $\Delta\alpha$ correspondra un accroissement ΔW de puissance absorbée tendant à limiter ce décalage. Le contraire a lieu dans la région DP'O : si le point P vient à dépasser le point D, l'action qui précédemment était retardatrice change de sens et devient accélératrice, de manière que le point P tombera en quelque sorte le long de la demi-circonférence DP'O. Et si l'excès de puissance motrice qui avait occasionné le décalage précédent subsiste, le point P dépassera encore le point D, en sorte qu'il y aura glissement continu de l'alternateur considéré par rapport aux autres unités du système.

154. Un défaut de puissance motrice ne saurait conduire au même résultat. Traçons le cercle inférieur OD' correspondant aux valeurs négatives de sin α, c'est-à-dire

à la marche en réceptrice de l'alternateur. Nous voyons comme précédemment que le régime est stable dans la région OND′ : car à tout accroissement de retard angulaire occasionné par une surcharge correspond un accroissement de puissance motrice ; il est instable dans la région OND′ par suite du fait inverse.

Soit ON la puissance absorbée par actions parasites : frottements, hystérésis, courant de Foucault, résistance de l'air, etc., etc., dans le groupe générateur considéré. Si la puissance motrice devient nulle, l'alternateur se décalera en arrière de l'angle α déterminant ON : or, comme ON mesure une puissance forcément très faible en comparaison de la puissance maxima OD = OD′ correspondant aux conditions d'excitation de l'alternateur, il s'ensuit que le décalage sera lui-même très loin de la valeur-limite $BOD' = \frac{\pi}{2}$ déterminant le décrochage. Pour que celui-ci pût se produire dans ces conditions, il ne suffirait donc pas de supprimer toute puissance motrice en fermant, par exemple, complètement la valve d'admission de vapeur : il faudrait de plus freiner la machine assez énergiquement pour absorber une puissance un peu supérieure à celle OD′ qu'elle est susceptible de fournir. Dans ces conditions, N dépassant D′, le couple moteur décroîtra au fur et à mesure qu'augmente le couple résistant, et l'alternateur finira par s'arrêter. Mais, sauf accident spécial pouvant bloquer le moteur, ou tout au moins accroître énormément ses résistances passives, cette action ne se produira pas spontanément, et les seules résistances passives que devra vaincre la puissance motrice fournie par les autres unités du système seront celles énoncées plus haut : de telle sorte que, même dans le cas où la puissance fournie par le moteur se réduit à o, le décalage de l'alternateur sera encore très inférieur à la valeur limite, et le régime sera parfaitement stable.

155. Ceci montre en particulier que la manœuvre qui consiste, pour effectuer le découplage, à diminuer progressivement la puissance motrice jusqu'à ce que le courant débité par l'alternateur se réduise à o, ne présente aucun danger. Si l'on vient à dépasser la limite par laquelle la puissance motrice équilibre exactement celle absorbée par les actions parasites, l'alternateur fonctionnera en réceptrice sans que la transition occasionne aucun à-coup dans la marche ; et l'électricien sera prévenu de cet état de choses par les indications de son ampèremètre. Il suffira dès lors de manœuvrer en sens inverse le régulateur de la machine, pour ramener celle-ci dans les conditions de puissance voulue.

156. Lorsque l'alternateur se décale en avant dans la région OPD, il faut, pour que l'angle limite de stabilité soit atteint, que la puissance motrice prenne la valeur maxima OD. On sera donc certain que le décrochage ne pourra pas se produire si les conditions d'établissement du moteur sont telles que la puissance maxima qu'il puisse développer soit inférieure à la valeur ci-dessus : c'est la condition de M. Boucherot (1).

Influence, sur la stabilité, du taux d'excitation des inducteurs. — 157. Le diamètre OD du cercle lieu des points P est, ainsi que nous le savons, proportionnel à la force électromotrice induite E, c'est-à-dire aux ampères d'excitation des inducteurs. A chaque valeur de E correspondra donc un cercle : et si la puissance motrice est maintenue constante lorsqu'on fait varier l'excitation, on voit que le décalage α sera d'autant plus faible pour une puissance donnée OP (fig. 66), que la force électromotrice E sera plus grande, et inversement.

Il en résulte que l'on pourra déterminer le décrochage

(1) *Éclairage électrique*, n° du 30 juillet 1892.

en *diminuant l'excitation* ; on voit en effet que la plus petite valeur que puisse prendre E est :

$$E = \frac{W}{K} = \omega l \frac{W}{V}.$$

Par contre, en augmentant l'excitation, on diminue le décalage et par suite on augmente la stabilité. Ceci ne s'applique évidemment que dans le cas où le nombre

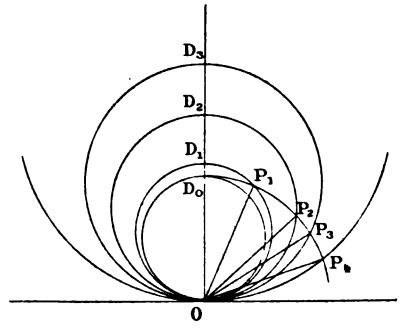

Fig. 66.

total d'alternateurs en parallèle est assez grand pour que les modifications apportées à l'excitation de l'un d'eux n'entraîne pas sur les autres des modifications inverses d'un ordre de grandeur analogue ; en particulier, dans le cas de deux alternateurs seulement, il n'y aura jamais lieu de chercher à augmenter la stabilité de l'un d'eux en agissant dans ce sens sur son excitation, car ceci conduirait forcément à diminuer d'une manière sensiblement égale l'excitation du second alternateur, et par suite à diminuer sa stabilité.

158. On peut d'ailleurs, dans le cas qui nous occupe, mettre plus clairement en évidence ce fait, d'ordre absolument général, qu'un accroissement d'excitation décale l'alternateur en arrière de son calage primitif, et inversement.

L'équation :

$$W = kE \sin \alpha$$

dans laquelle W est actuellement la constante, est celle d'une droite parallèle à OB (fig. 67) et distante de cette dernière de la longueur :

$$OP = W \frac{\omega l}{V}.$$

c'est le résultat que nous avons déjà trouvé dans le cas de

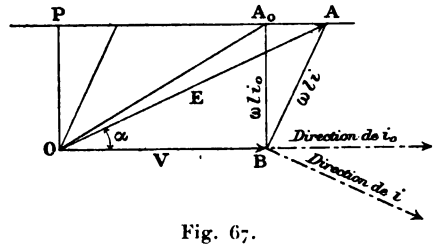

Fig. 67.

deux alternateurs : il est donc général, quel que soit le nombre des alternateurs en parallèle, et il justifie l'énoncé ci-dessus.

159. Nous voyons en outre que, dans ce cas encore, il existe une valeur déterminée de l'excitation pour laquelle le courant débité par l'alternateur considéré est en phase avec la différence de potentiel aux bornes du réseau, son intensité étant en même temps la plus petite possible. A première vue, on pourrait croire qu'il y a lieu de chercher à donner cette valeur à l'excitation, puisqu'elle attribue à l'échauffement de l'induit la plus petite valeur compatible avec la puissance développée par l'alternateur. Il n'en est cependant rien, car il est de toute évidence que cette condition ne peut être réalisée simultanément sur tous les alternateurs en parallèle : car si tous les courants débités par chacun d'eux pouvaient coïncider en phase avec la différence de potentiel aux bornes du réseau, il en résulterait que le décalage du

courant total fourni au réseau serait nul, quelles que fussent ses conditions d'impédance, ce qui est évidemment impossible.

Influence des variations périodiques du couple moteur. — 160. Dans le cas où les machines motrices sont des machines à vapeur, ou plus généralement des moteurs à mouvement alternatif, le couple moteur est une fonction périodique, de telle sorte que la vitesse

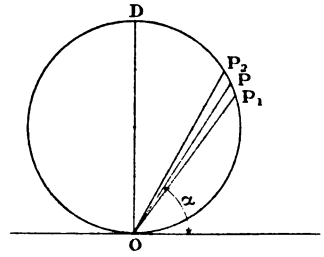

Fig. 68.

angulaire de l'alternateur varie elle-même périodiquement de part et d'autre de deux valeurs extrêmes. L'inertie des pièces en mouvement ne peut que corriger partiellement cette action, sans jamais l'annuler d'une façon complète ; il en est de même des réactions électriques auxquelles elle peut donner naissance. En fait, elle ne saurait en aucun cas être considérée comme absolument négligeable, et l'élément de trouble qu'elle apporte dans la marche en parallèle est souvent l'un des plus graves qui puissent compromettre la régularité et la stabilité de celle-ci.

161. Reprenons le cas limite du paragraphe précédent. L'alternateur développant, dans les conditions de régime actuel, la puissance $W = OP$, avec une force électromotrice induite E déterminant le diamètre du cercle (fig. 68), le calage de cette force électromotrice par rapport à V est mesuré par l'angle α. Si le couple moteur

varie périodiquement, cet angle α et la puissance W correspondante ne seront que les valeurs moyennes de fonctions périodiques ; en réalité, le point P oscillera entre deux positions extrêmes P_1, P_2, la différence $OP_1 - OP_2 = \Delta W$ mesurant la variation maxima de la puissance motrice, et l'angle $2\Delta\alpha$ l'amplitude de l'oscillation.

Cette amplitude sera, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus grande que l'angle α déterminant la puissance W pour une excitation donnée sera lui-même plus grand. En effet, on peut définir le degré de stabilité dans la région voisine du point P comme étant la valeur $\frac{dW}{d\alpha}$ de la variation de puissance rapportée à l'unité de déplacement angulaire dans cette région. Or, on a :

$$\frac{dw}{d\alpha} = kE \cos \alpha$$

ce qui montre que la stabilité, maxima dans le voisinage de $\alpha = 0$, décroît au fur et à mesure que le décalage augmente, et devient nulle quand P arrive en D ; autrement dit, l'écart angulaire $\Delta\alpha$ correspondant à la variation de puissance ΔW sera d'autant plus grand que le point P sera plus près du sommet D.

162. Il en résulte ce fait, très intéressant au point de vue pratique, que, pour une valeur donnée de l'excitation, l'effet des variations périodiques du couple moteur sera d'autant plus accentué que la phase de l'alternateur sera plus en avance. Dans ces conditions, le décrochage pourra très bien se produire pour un décalage moyen α inférieur à 90°, l'oscillation périodique du point P l'entraînant au delà de la limite D.

Mais, alors même que serait remplie la condition de M. Boucherot appliquée, ainsi qu'il le fait, non plus à la puissance effective, mais à la valeur instantanée du couple moteur, il pourra cependant arriver que la marche

en parallèle cesse, du fait de ces oscillations, d'être satisfaisante au point de vue de la fixité de l'éclairage.

163. Pratiquement, en effet, la stabilité, tout en subsistant, cesse d'être suffisante dès que les écarts angulaires $\Delta\alpha$ dépassent la limite au delà de laquelle les oscillations deviennent perceptibles dans la lumière. Nous voyons, d'après ce qui précède, que ces oscillations deviendront, toutes choses égales d'ailleurs, de plus en plus marquées lorsque l'angle α ira en s'accroissant ; en général, on sera prévenu que l'alternateur se trouve dans de mauvaises conditions de stabilité, bien avant qu'il y ait danger réel de décrochage. Les réactions électriques qui se produisent dans ce cas sont le plus souvent visibles sur les appareils de mesure avant même que la fixité de l'éclairage ne soit sérieusement troublée ; en effet, la période de ces oscillations est toujours très longue comparativement à celle du courant principal, et les courants périodiques qu'elles engendrent peuvent avoir leur action enregistrée par les ampèremètres. Avec un moteur à un seul cylindre, et dans les meilleures conditions de stabilité correspondant à la plus courte période, il y aura deux oscillations complètes par tour, soit une période par course de piston. Si le nombre de tours par minute est de 60, la fréquence de l'oscillation sera donc seulement de 2 par seconde. Lorsque l'amplitude $\Delta\alpha$ s'accroît, on constate en même temps que la fréquence diminue ; l'oscillation n'est plus synchrone des coups de piston, et c'est même là le critérium d'un défaut de stabilité. A chaque variation de vitesse $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ correspond une force électromotrice induite ; les courants de longue période ainsi produits ont pour effet de transformer en ligne sinueuse la ligne droite définissant l'intensité efficace lue sur l'ampèremètre, l'aiguille de ce dernier oscillant entre deux positions extrêmes.

Cet effet peut, en particulier, se manifester d'une manière plus sensible sur l'ampèremètre mesurant l'intensité du courant d'excitation dans les inducteurs. Le bobinage inducteur est, en effet, lui-même le siège de ces courants de longue période ; en général, l'appareil destiné à mesurer des courants continus, ne possédant pas le même degré d'amortissement que celui établi sur le circuit du courant alternatif, indiquera d'une façon plus nette les variations correspondantes.

De plus, le ronflement des alternateurs varie d'intensité suivant la loi périodique des oscillations, et fournit une indication acoustique qui présente sur toute autre l'avantage de s'imposer immédiatement à l'attention.

Enfin, une indication optique très précieuse est donnée par l'éclairement de la partie tournante de l'alternateur au moyen d'arcs à courants alternatifs. On sait, en effet, que, d'après un phénomène bien connu et sur lequel nous reviendrons par la suite, l'intersection des rayons lumineux, ainsi produits, avec la partie tournante de l'alternateur dont le courant alimente les arcs, donne une image qui paraît fixe dans l'espace ; cette image se déplacerait, soit dans le sens de rotation de l'alternateur, soit dans le sens inverse, si la fréquence de la source alternative alimentant les arcs était plus petite ou plus grande que celle de l'alternateur considéré. Dans le cas qui nous occupe, la source alternative en question sera un transformateur dont le primaire est pris en dérivation sur la différence de potentiel V aux bornes du réseau ; les variations périodiques de vitesse propres à chaque alternateur seront dès lors mises en évidence par un mouvement pendulaire de l'écran lumineux. C'est l'illustration exacte des conditions définies au paragraphe 161 et par le schéma de la figure 68 ; à chaque pôle inducteur, si c'est l'inducteur qui tourne, correspondra

un axe lumineux OP (fig. 68), qui paraîtra osciller entre deux positions extrêmes OP_1 et OP_2.

164. En définitive, on voit qu'il sera facile de déterminer l'alternateur dont l'excès de décalage en avant occasionne le trouble, toutes les fois que le nombre total des alternateurs en parallèle sera assez grand pour que la répercussion sur chacun des autres produise des effets d'un ordre de grandeur nettement différent de ceux qu'on observe sur l'un d'eux. Il suffira dès lors de diminuer le décalage en avant de celui-ci, en agissant sur le régulateur de puissance de manière à restreindre le couple moteur. Notons que, si le réglage des puissances et des excitations a été opéré de manière à placer l'ensemble des unités dans les conditions de marche normale définies précédemment, il sera très rare que semblable cause de trouble intervienne ; il peut néanmoins arriver exceptionnellement qu'à calage égal, telle unité du système se trouve, du fait de conditions spéciales propres à son moteur, moins stable que les autres. On sera dès lors forcé de restreindre sa charge ; mais il y aura lieu de rechercher par la suite la cause qui donne de l'irrégularité à la marche du moteur.

165. Il est plus difficile de déterminer l'unité sur laquelle doit porter le réglage, dans le cas où le nombre d'alternateurs se réduit à deux ; car alors les effets signalés précédemment ont sensiblement sur l'un et sur l'autre la même importance. Dans le cas général, c'est toujours sur l'alternateur qui débite le plus, qu'il conviendra d'agir ; si les intensités étaient déjà égales, il faudra procéder par tâtonnements. Mais, dans ce dernier cas, la cause première résidera toujours dans un défaut de fonctionnement du moteur.

Importance du régulateur de puissance. — 166. Tout ce qui précède concourt à démontrer de la manière

la plus absolue que le régulateur de puissance, permettant de faire varier à volonté le couple moteur d'une machine, au cours de la marche et indépendamment de ses conditions de vitesse, est un organe aussi indispensable à la conduite de la marche en parallèle, que l'est le rhéostat d'excitation dont est toujours muni chaque alternateur. Il y a lieu d'insister là-dessus, car cette nécessité spéciale ne paraît pas, jusqu'à ces dernières années du moins, avoir été suffisamment prise en considération par les constructeurs, de telle sorte que la presque totalité des installations existantes ne comportent aucun organe de ce genre. Répétons-le : les régulateurs ordinaires des machines, étant exclusivement des régulateurs de *vitesse*, ne satisfont aucunement aux conditions énoncées ; leur rôle se borne dans le cas actuel à modifier simultanément, et dans la même proportion sur toutes les machines, la puissance motrice de celles-ci lorsque varient les conditions du réseau extérieur; et ils ne sauraient se prêter à un réglage individuel, sauf addition d'un dispositif spécial non soumis à l'action automatique qui détermine leur fonctionnement.

Il n'existe pas, tout au moins à notre connaissance, de régulateur automatique de *puissance*, en fonctionnement dans les usines centrales ; au reste, il n'est pas nécessaire que l'action régulatrice soit automatique ; peut-être même est-il préférable qu'elle ne le soit pas, pourvu que l'organe de réglage soit commodément manœuvrable à la main, et se trouve placé de manière que le conducteur puisse se conformer aux indications transmises par l'électricien chargé du tableau. L'idéal serait évidemment de disposer la commande du régulateur à côté de celle du rhéostat d'excitation, de manière que l'électricien ait sous la main les deux éléments du réglage, mais ceci présente l'inconvénient d'entraîner des complications mécaniques.

A défaut d'autre régulateur, on peut faire servir à cet usage la valve d'admission de vapeur. Mais ce procédé est incommode à deux points de vue : d'abord, pour les moteurs de grande puissance, la manœuvre de la valve est généralement assez dure, surtout dans le voisinage des très petites ouvertures, de telle sorte que le réglage n'a pas la précision désirable (1) ; en outre, la chute de pression est, pour un étranglement donné, proportionnelle au volume de vapeur passant au cylindre, de telle sorte que la pression à l'admission se trouvera varier, abstraction faite de tout réglage ultérieur, en sens inverse de la charge imposée à l'ensemble par les conditions du réseau. Un détendeur remplirait plus complètement les conditions imposées, car les pressions une fois convenablement graduées sur les différents moteurs conserveraient par la suite leurs valeurs respectives, indépendamment des variations de charge. Mais le mieux serait que l'on pût modifier suivant les besoins le degré d'admission ; en principe, les moteurs destinés à la commande d'alternateurs devraient toujours être étudiés dans ce sens.

Influence prépondérante des conditions motrices. — 167. Il est tout à fait hors de doute que le succès de la marche en parallèle des alternateurs ne dépende, *pour une très grande part*, des conditions de marche des machines motrices qui les actionnent. *Celles-ci devront toujours avoir été étudiées en vue de cette destination*

(1) La manœuvre du découplage exige, ainsi que nous l'avons vu, que la puissance du moteur puisse être restreinte à la valeur strictement nécessaire pour équilibrer les pertes par actions parasites ; ceci nécessite que l'ouverture de la valve soit extrêmement réduite, et c'est précisément dans le voisinage de l'étranglement maximum que l'action doit être la plus progressive, afin que l'on puisse atteindre exactement le degré voulu pour que l'alternateur ne fonctionne ni comme génératrice, ni comme réceptrice.

spéciale ; un type déterminé de machine convenant très bien à tout autre service, tel par exemple que la commande de dynamos à courant continu, pourra donner de détestables résultats dans le cas qui nous occupe, et il est probable que nombre d'échecs sont dus à ce que cette considération de premier ordre avait été laissée de côté.

Les facteurs qui interviennent le plus directement dans la question sont :

168. 1° *En première ligne, le degré de constance du couple moteur.* — Les considérations qui précèdent ont montré que les variations de ce couple donnent lieu à un décalage périodique des forces électromotrices induites, lequel, dans tous les cas, ne peut que compromettre la stabilité du synchronisme. Aussi les machines à vapeur sont-elles, à ce point de vue spécial, très inférieures aux turbines hydrauliques.

A ce qui a été dit précédemment sur ce sujet, ajoutons que deux machines dont le fonctionnement individuel serait satisfaisant au point de vue de la fixité de l'éclairage pourront, une fois couplées, et du fait seul de cette action, donner des résultats tout différents, si les variations périodiques de leurs couples respectifs ne coïncident pas en phase.

Le décalage des forces électromotrices sera d'autant plus grand que l'écart sera lui-même plus grand entre les valeurs au même instant de ces couples ; il sera maximum si le couplage est tel que l'un des couples soit maximum à l'instant où l'autre passe par sa valeur minima. On peut, il est vrai, arriver à réaliser le couplage à l'instant où les organes moteurs des deux unités se trouvent dans la même position relative, mais cette complication dans la manœuvre ne doit pas être rendue nécessaire.

Pour une puissance donnée, et toutes choses égales d'ailleurs, la grandeur du couple et par suite le taux de sa variation périodique varieront en sens inverse du

nombre de tours de la machine ; il y a donc en principe intérêt à employer des moteurs à grande vitesse ; mais d'autre part il ne faut pas perdre de vue les inconvénient inhérents à ce genre de machine. En second lieu, l'emploi de machines à double ou triple expansion, avec deux manivelles calées à 90°, contribuera puissamment à régulariser la marche ; deux machines jumelles attaquant chaque extrémité de l'arbre de l'alternateur rempliront d'ailleurs le même but avec plus de certitude encore, car, dans une machine Compound, les puissances développées dans chacun des cylindres ne sont exactement égales que pour les conditions de puissance totale prévues au projet. Pour ce qui concerne l'inertie des pièces en mouvement, il est certain qu'à ce point de vue spécial son influence ne peut qu'être favorable.

169. 2° *Le mode d'action du régulateur automatique de vitesse.* — Il doit être muni d'un amortisseur très énergique, car il importe qu'il demeure tout à fait indifférent aux variations périodiques de vitesse, étant donné qu'il serait impuissant dans tous les cas à les corriger, et que le mouvement, de période propre à ses conditions d'inertie, qu'il prendrait sous leur influence ne ferait dans le cas général qu'introduire un nouvel élément de trouble dans la marche. Son rôle se réduit, comme nous le savons, à maintenir constante la fréquence ; il n'est d'ailleurs pas indispensable que cette constance soit absolue, et peut-être vaut-il mieux d'autre part, d'après l'opinion de quelques praticiens, que la précision du réglage automatique ne soit pas trop stricte. Pratiquement, on peut admettre au moins une variation de 5 p. 100 entre la vitesse à vide et celle à pleine charge.

170. 3° *Le réglage de la distribution de vapeur.* — Abstraction faite de toute action modératrice telle que l'inertie, la distribution détermine les lois suivant lesquelles varient le couple moteur entre ses deux valeurs

limites. Ce sera d'elle que dépendra en particulier la durée d'une variation donnée. Il y a intérêt à ce que cette variation soit progressive plutôt que brusque ; les machines du type Corliss paraissent à ce point de vue moins recommandables que les machines à tiroir.

Toute dissymétrie dans la façon dont la vapeur travaille sur l'une ou l'autre face des pistons, toute fuite de vapeur, et en général toute irrégularité dans le fonctionnement, seront autant de causes pouvant contribuer à troubler la stabilité.

Par exemple, on pourrait croire que, dans le cas des machines Compound, peu importe qu'il se produise des fuites dans la distribution du cylindre à haute pression, ou dans ce cylindre lui-même, puisque la vapeur n'est pas perdue, de ce fait qu'elle passe directement au grand cylindre où elle accomplit son travail. Il est vrai que ceci peut n'avoir aucune importance au point de vue économique, et la puissance du moteur s'en trouve même accrue par suite de l'accroissement de pression au grand cylindre. Mais, outre la dissymétrie qui peut en résulter dans les couples moteurs, nous savons qu'un excès de puissance est une cause de désynchronisation.

171. En résumé, dans le cas où l'une des machines, après une période de fonctionnement régulier, paraîtrait introduire un élément de trouble dans la marche en parallèle, il y aura lieu de vérifier tout d'abord l'état de son régulateur, et en particulier celui du frein servant à amortir ses déplacements ; en relevant des diagrammes sur la machine en fonctionnement normal, on pourra se rendre compte ensuite des conditions dans lesquelles s'opère la distribution, et de l'importance des fuites.

172. La méthode stroboscopique, déjà mentionnée plus haut, pourra fournir dans ce cas de précieux éléments de comparaison. Rappelons d'une manière succincte le principe sur lequel elle repose.

Soit OA (fig. 69) une tige décrivant d'un mouvement uniforme un cercle autour du point O. Supposons qu'une source lumineuse intermittente l'éclaire, à chaque tour, au moment précis où elle occupe une position déter-

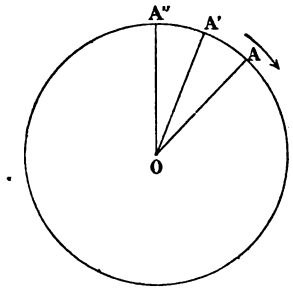

Fig. 69.

minée, toujours la même ; la salle étant dans l'obscurité le reste du temps. Il est évident que la tige paraîtra dès lors occuper toujours cette position, puisqu'elle n'est pas visible pour toute position différente ; et si le mouvement est suffisamment rapide, la persistance de l'impression sur la rétine fera que l'on aperçoive d'une manière permanente une ligne lumineuse immobile dans l'espace.

Si maintenant on diminue la vitesse de rotation, les intermittences d'éclairage se succédant d'autre part aux mêmes intervalles que précédemment, la tige, qui occupait la position OA à l'instant t où l'éclairage s'est produit une première fois, occupera les fois suivantes les positions successives OA′, OA″, etc... ; elle paraîtra dès lors tourner d'un mouvement uniforme en sens inverse de son mouvement effectif. Inversement, elle semblera se déplacer dans le sens même de ce mouvement, si l'on augmente sa vitesse angulaire initiale.

Ceci s'applique évidemment à une figure quelconque, tournant sans se déformer autour du point O : la con-

dition générale pour qu'elle semble immobile dans l'espace sera que les éclairements consécutifs se succèdent aux instants précis où elle présente même apparence aux yeux de l'observateur. Si l'on considère par exemple un polygone régulier ayant son centre au point O, le fait se

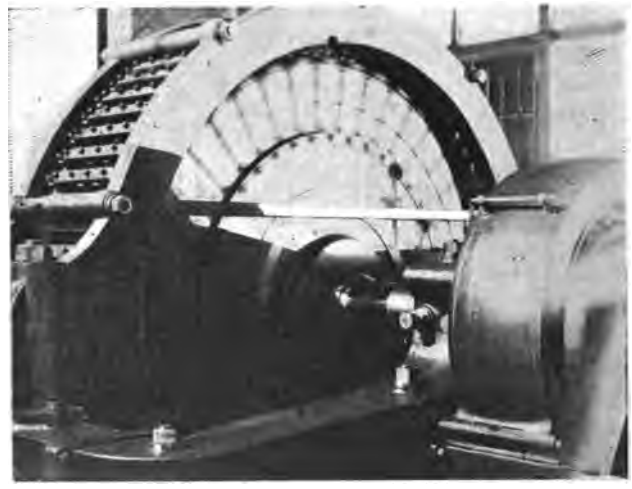

Fig. 70.
Alternateur en marche éclairé par un arc synchrone.

produira en particulier si la vitesse de rotation est telle que les éléments identiques se succèdent à la même place aux instants précis où l'éclairement a lieu.

Par exemple, un inducteur de machine possédant 40 pôles radiaux et tournant à la vitesse de 2 tours par seconde semblera immobile s'il est éclairé par une source lumineuse ayant 80 intermittences par seconde ; cette condition sera réalisée si la source est un arc alimenté par le courant de la machine (fig. 70).

173. On peut encore mettre d'une autre manière ce phénomène en évidence. Supposons que l'on regarde tourner l'inducteur à travers celui d'une seconde machine

en mouvement, située dans un plan parallèle au plan de la première. Le second alternateur fera l'office d'un écran qui masquerait périodiquement le premier, produisant une série d'éclipses consécutives également espacées. Si l'inducteur est rendu visible aux instants où ses pôles se retrouvent dans la même position relativement à ceux de l'induit, il semblera, comme précédemment, immobile. La condition est évidemment, si les deux inducteurs sont identiques, que leurs vitesses respectives soient exactement égales.

174. On peut ainsi contrôler d'une manière extrêmement précise l'état du mouvement d'un alternateur. En marche normale, les oscillations dues au couple moteur sont très nettement visibles, soit qu'on éclaire l'inducteur à l'aide d'un arc, soit qu'on le regarde à travers celui de la machine voisine. La méthode permet en outre de comparer les vitesses de deux alternateurs, tournant à vide, ou dans des conditions de charge identiques, sans être couplés, et d'évaluer l'écart de ces vitesses avec une précision incomparablement supérieure à celle que donnerait le compte-tours. En effet, cet écart est mesuré par la vitesse du déplacement relatif de l'un des inducteurs par rapport à l'autre, déplacement qu'il est facile d'observer comme il vient d'être dit, car si l'inducteur que l'on observe tourne plus vite que celui qui sert d'écran, il paraîtra se déplacer dans le sens de son mouvement effectif, et inversement. Dans le cas général, cette vitesse apparente sera assez faible pour que l'on puisse facilement compter le nombre de pôles passant, dans une minute, devant un repère fixe pris sur l'induit ; supposons que le nombre des pôles étant 40, on ait constaté qu'il en est passé 20 devant le repère : l'écart cherché sera exactement de un demi-tour par minute. On peut apprécier de la sorte un écart de vitesse de l'ordre de grandeur de $\frac{1}{N}$ tour, N étant le nombre des pôles ; de telle sorte

que si celui-ci est de 100, l'approximation pourra être de un centième de tour.

Cette méthode est à la fois la plus commode et la plus précise que l'on puisse adopter pour base du réglage des vitesses en dehors des heures de marche.

Cas de deux alternateurs recevant, par courroies, le mouvement d'une transmission commune. — 175. Les courants alternatifs étant en général limités comme emploi aux distributions urbaines, leur génération dans les usines centrales comportera le plus souvent des unités assez puissantes pour qu'il y ait lieu d'attribuer à chacune d'elles un moteur spécial. Il pourra néanmoins se présenter, à titre exceptionnel, des cas où il y ait lieu de commander deux ou plusieurs alternateurs par une transmission commune actionnée par un moteur unique.

Cette disposition n'est d'ailleurs pas à recommander, car le réglage des puissances transmises à chaque unité sera évidemment plus délicat dans ce cas que dans le précédent. Notons que le fonctionnement en parallèle reposera dès lors sur le glissement inégal des courroies : car il est matériellement impossible, quel que soin que l'on ait apporté au calibrage des poulies de commande, que les vitesses déterminées par le rapport des diamètres soient les mêmes pour les deux machines. L'égalisation des charges au cours de la marche ainsi que les manœuvres de couplage et de découplage ne pourront s'opérer qu'en modifiant suivant les besoins la tension de la courroie ; il sera donc indispensable de disposer sur chaque commande un tendeur qui donne toutes facilités à cet égard, cet appareil étant appelé à jouer, dans le cas actuel, le rôle de régulateur de puissance.

Procédés usuels de couplage ; lampes et volt-

mètres indicateurs de phase ; synchronisateurs. — 176. Nous savons que, pour effectuer le couplage d'un alternateur, il faut d'abord amener sa vitesse à une valeur voisine de celle des unités déjà en service, puis le fermer sur le circuit commun à l'instant précis où sa force électromotrice est en phase avec la différence de potentiel aux bornes du réseau.

Le procédé le plus communément employé, d'abord pour juger de l'écart des vitesses en vue de le corriger le plus possible, puis pour connaître l'instant de la concordance des phases, consiste dans l'emploi de deux lampes, dites lampes de phase, montées en série (fig. 71) avec les secondaires de deux transformateurs dont les primaires sont respectivement établis aux bornes des deux forces électromotrices ci-dessus. A un instant donné, l'intensité lumineuse des lampes sera fonction du décalage de ces forces électromotrices ; elles s'allumeront et s'éteindront successivement au fur et à mesure du glissement de l'alternateur considéré par rapport aux autres, et ces alternatives d'éclairage et d'extinction seront évidemment d'autant plus rapprochées que ce glissement sera lui-même plus rapide, c'est-à-dire que l'écart des vitesses sera plus grand. La manœuvre du régulateur de puissance devra donc tendre à attribuer à ces variations périodiques la plus longue période possible ; la pratique indiquera dans chaque cas la valeur limite de l'écart admissible pour les vitesses, qui, évidemment, ne pourront jamais être rendues rigoureusement égales.

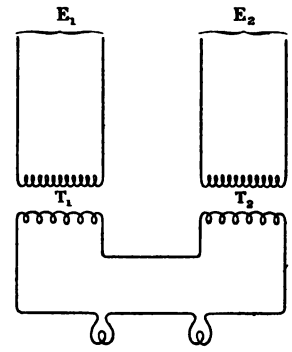

Fig. 71.

177. Suivant la manière dont auront été connectés les

secondaires des transformateurs, les forces électromotrices dans le circuit comprenant les deux lampes se trouveront soit en opposition, soit en tension, à l'instant de la concordance de phase des forces électromotrices primaires. Cette concordance pourra donc, *ad libitum*, être indiquée par l'extinction ou le maximum d'éclat des lampes. Bien que la première combinaison soit préconi-

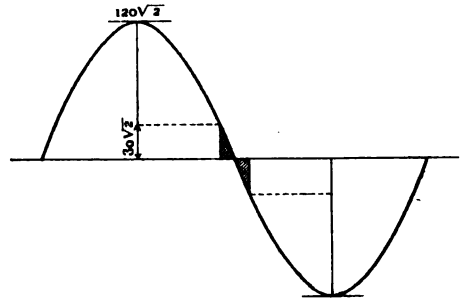

Fig. 72.

sée par la plupart des auteurs, il semble cependant qu'il soit préférable de choisir la seconde. En effet, l'éclat maximum correspond à un point de la sinusoïde (fig. 72), tandis que, étant donné qu'une lampe de 100 à 110 volts ne commence à rougir que dans le voisinage de 30 volts aux bornes, la période d'extinction comprendra tout l'arc compris entre + 30 et — 30 volts. En se basant sur l'extinction des lampes pour effectuer le couplage, on pourra dès lors commettre une erreur assez importante.

On peut objecter que l'instant de l'éclat maximum n'est pas non plus facilement saisissable ; toutefois, l'erreur commise dans ce cas sera généralement plus faible que dans le précédent. Au reste, ce procédé ne doit pas être donné comme comportant toute la précision que nécessite la mise au couplage des alternateurs de grande puissance. Si l'on veut que cette opération n'apporte aucun trouble dans l'éclairage extérieur, il faudra restreindre l'emploi

des lampes de phase à la comparaison des vitesses avant le couplage ; encore ce procédé présente-t-il une lacune, car il n'indique pas dans quel sens la régulation doit être opérée, et il y aurait avantage, à ce point de vue, à lui substituer un indicateur basé sur la méthode stroboscopique, lequel permettrait non seulement d'apprécier l'écart des vitesses, mais encore de savoir en même temps si celle de l'alternateur considéré est la plus grande ou la plus faible.

Pour ce qui concerne la détermination de l'instant auquel doit être opéré le couplage, on peut déjà obtenir une indication plus précise en substituant aux lampes un voltmètre thermique. Mais le dispositif suivant paraît devoir éliminer toute cause d'erreur, et donne d'excellents résultats pratiques, au prix, il est vrai, d'une certaine complication.

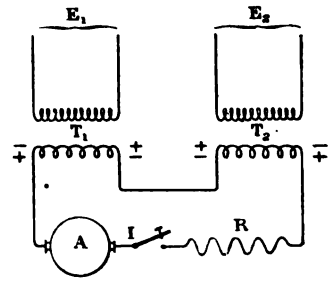

Fig. 73.

178. Soient T_1 et T_2 (fig. 73) deux transformateurs dont les primaires sont respectivement reliés, comme les précédents, aux bornes du tableau et aux bornes de l'alternateur considéré. Les secondaires sont montés en opposition, c'est-à-dire que le circuit comprenant une résistance ohmique R et un ampèremètre A ne sera le siège d'aucun courant lorsque les forces électromotrices aux bornes des primaires seront égales et en concordance de phase. Un interrupteur I laisse ouvert ce circuit jusqu'à l'instant où l'électricien, se basant comme première approximation, soit sur les lampes, soit sur les voltmètres indicateurs de phase, vient, en le fermant, opérer le couplage des deux secondaires.

A cet instant, si les forces électromotrices aux bornes des primaires sont égales et en phase, le courant sera

nul dans le circuit secondaire. La différence des vitesses intervenant alors pour décaler l'alternateur par rapport aux autres, un courant, d'intensité limitée par la valeur de la résistance R, prendra naissance dans ce circuit, et son intensité ira en croissant avec le décalage des forces électromotrices primaires. Un courant d'intensité proportionnelle traverse en même temps l'induit de l'alternateur, qui se trouve ainsi dans les mêmes conditions que s'il était relié au réseau par une résistance équivalente. Le couplage se trouve donc opéré par l'intermédiaire du circuit secondaire, et l'alternateur se trouve de la sorte soumis à une action synchronisante qui doit, si la puissance des transformateurs et la valeur de la résistance ohmique R ont été convenablement choisies, pouvoir corriger un petit écart des vitesses initiales, tout en demeurant assez restreinte comme effet, pour n'apporter aucun trouble dans la marche.

Cela étant, si la vitesse de l'alternateur a été amenée à la valeur convenable avant la mise au couplage, le synchronisme pourra subsister avec un décalage variable d'un instant à l'autre. Les indications de l'ampèremètre varieront entre le o de la graduation et une valeur maxima quelconque. Si l'on choisit, pour fermer la machine en court-circuit sur le réseau, l'instant où l'ampèremètre indique o, on sera sûr qu'à cet instant les conditions théoriques sont exactement remplies : les forces électromotrices en présence se trouvant alors exactement égales et en phase. Les vitesses sont d'ailleurs les mêmes, puisque le synchronisme existait déjà, du fait du couplage des secondaires.

Au cas où ce couplage provisoire ne subsisterait pas, il suffirait d'ouvrir l'interrupteur, et de procéder à un réglage plus approché de la vitesse. On peut ainsi faire précéder le couplage d'une série d'essais qui ne compromettront en rien la stabilité et la régularité de la marche,

si la puissance mise en jeu par l'intermédiaire des transformateurs est restreinte à une valeur suffisamment faible (1).

Influence des variations de charge. — 179. L'expérience montre que les variations, même très brusques, de débit sur le réseau n'ont pas, sur la stabilité de la marche en parallèle, l'effet nuisible qu'il semblerait à première vue y avoir lieu de leur attribuer. Nous avons vu à diverses reprises des courts-circuits se produire, puis se couper instantanément sur la ligne, sans que jamais ces accidents, quelle que fût leur importance, aient engendré un élément de trouble subsistant à leur action immédiate ; dans ces occasions, les alternateurs au couplage se comportaient comme si leur ensemble eût été remplacé par un seul. Ceci d'ailleurs s'explique facilement, si l'on considère que le surcroît de charge se répartira d'une manière identique sur tous les alternateurs, tout au moins dans le cas où ceux-ci se trouvaient déjà dans les mêmes conditions de puissance.

En somme, il semble à peu près démontré par la pratique que, lorsque des oscillations se produiront dans la marche en parallèle, la cause devra, dans la grande majorité des cas, être attribuée aux conditions de fonctionnement de l'un des moteurs : soit que la puissance développée par lui soit trop grande comparativement à celle des autres moteurs, soit que sa marche soit irrégulière pour l'un ou l'autre des motifs indiqués plus haut ; on ne saurait toutefois définir à priori tous les éléments de trouble qui peuvent intervenir, aussi convient-il de considérer les indications qui précèdent comme se rapportant aux cas les plus fréquents, sans prétendre les embrasser tous.

---

(1) Cette puissance, dans l'application qui a été faite de ce principe à l'usine centrale du secteur de la rive gauche de Paris, ne dépasse pas $\frac{1}{30}$ de la puissance maxima d'un des alternateurs.

CHAPITRE V

TRANSFORMATEURS

Flux effectif dans le circuit magnétique : composition des flux générateurs et de réaction. — Forces électromotrices : force électromotrice induite dans une spire ; disponible aux bornes du secondaire ; différence de potentiel aux bornes du primaire. — Principes généraux du fonctionnement : transformation de l'énergie : intensité du courant primaire : courant magnétisant. — Rapport de transformation. — Variation de l'intensité primaire en fonction de l'intensité secondaire ; effets du décalage au secondaire. — Dispersion magnétique ; détermination expérimentale des forces électromotrices de self-induction dans les deux bobinages ; chute de tension dans le transformateur en fonction de l'intensité et du calage du courant secondaire. — Hystérésis et courants de Foucault. — Conditions pratiques du fonctionnement ; son mécanisme.

180. Soit (fig. 74) C un circuit magnétique de section uniforme et de réluctance constante, constitué par du fer convenablement divisé, et sur lequel sont bobinés deux enroulements dont l'un (primaire), comprenant n_1 spires, reçoit le courant distribué par le réseau, tandis que l'autre (secondaire), comprenant n_2 spires, alimente les récepteurs.

En une section transversale quelconque Sx, la valeur $\mathfrak{B}x$ de l'induction magnétique sera à chaque instant la différence entre les valeurs $\mathfrak{B}_1x$ et $\mathfrak{B}_2x$ auxquelles donneraient respectivement lieu les ampères-tours primaires et secondaires agissant isolément.

Dans les conditions réelles de la pratique, la valeur de

$\mathfrak{R}_x$ n'est pas absolument indépendante de la section choisie : car, bien que la réluctance du circuit extérieur constitué par le cuivre des conducteurs et par l'air soit très considérable relativement à celle du circuit fer, ce dernier ne canalise cependant jamais l'absolue totalité des lignes de force, dont un nombre plus ou moins grand vient se fermer dans le milieu ambiant. On définit ce fait par le terme de *dispersion magnétique* ; il joue dans le fonctionnement du transformateur un rôle très important, que nous étudierons plus loin. Pour l'instant, nous admettrons que la dispersion est nulle, et par suite que le flux est constant dans toute l'étendue du circuit magnétique constitué par le fer ; nous considérerons en outre comme négligeable l'influence des courants de Foucault et celle de l'hystérésis.

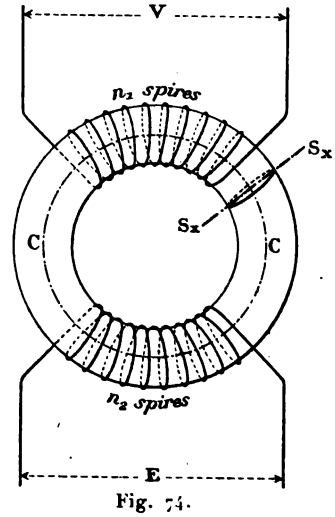

Fig. 74.

181. Soit, dans ces hypothèses, $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ la valeur instantanée du flux à travers une spire quelconque bobinée sur le noyau C. Cette spire sera le siège d'une force électromotrice :

$$e_t = -\frac{d\Phi}{dt}$$

dont la valeur efficace sera par suite :

$$e = -\omega \frac{\Phi_0}{\sqrt{2}} = -\omega \Phi_m$$

en désignant par Φ_m la valeur efficace du flux définie comme il a été dit au paragraphe 20.

La valeur efficace e_2 de la force électromotrice induite au secondaire, comportant n_2 spires identiques, sera donc :

$$e_2 = n_2 e = -n_2 \omega \Phi_m.$$

Soient i_1 et i_2 les intensités efficaces des courants au primaire et au secondaire ; posons :

$$\Phi_1 = 4\pi \frac{\mu S}{l} n_1 i_1 = K n_1 i_1$$

$$\Phi_2 = 4\pi \frac{\mu S}{l} n_2 i_2 = K n_2 i_2$$

μ désignant la perméabilité du circuit magnétique, l sa longueur, et S sa section. La valeur de Φ_m sera la somme géométrique de Φ_1 et de Φ_2 ainsi définis.

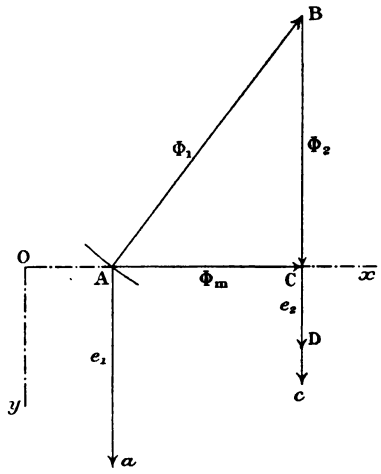

Fig. 75.

Prenons (fig. 75) pour direction-origine celle Ox du vecteur relatif à Φ_m. La force électromotrice e, et par suite e_2, est en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur Φ_m : son vecteur aura donc la direction Oy, et si le circuit secondaire constitué par les récepteurs ne comporte pas de self, le courant d'intensité i_2 qui l'alimente sera en phase avec e_2, et son vecteur aura par suite une direction BC perpendiculaire à Ox.

Prenons BC $= K n_2 i_2$, et du point B comme centre avec un rayon égal à $K n_1 i_1$, décrivons un arc de cercle coupant Ox en A : le vecteur AC, somme géométrique

de AB $= \Phi_1$ et de BC $= \Phi_2$, définira le flux effectif Φ_m, dans le circuit magnétique du transformateur.

Si le circuit d'utilisation comporte de la self, le courant i_2, et par suite le vecteur BC, sera décalé d'un certain angle φ_2 par rapport à la direction Oy ; le point A se déterminera comme précédemment (fig. 76).

Forces électromotrices. — 182. 1° *Forces électromotrices induites.* — Dans chaque spire bobinée sur le noyau, le flux Φ_m induit une force électromotrice :

$$e = -\omega\Phi_m.$$

Il en résulte que le bobinage primaire, comportant n_1 spires, et le secondaire, comportant n_2 spires, seront respectivement les sièges des forces électromotrices :

$$e_1 = n_1 e$$
$$e_2 = n_2 e$$

agissant, la première, comme force électromotrice de réaction, antagoniste de la différence de potentiel aux bornes du réseau alimentant le primaire ; la seconde, comme force électromotrice génératrice du courant dans le circuit secondaire.

Ces deux forces électromotrices, étant engendrées par le même flux Φ_m, auront par suite même calage Oy. Sur le diagramme (fig. 76), nous prendrons le point A pour origine du vecteur Aa relatif à e_1, et le point C pour origine du vecteur Cc relatif à e_2 : les longueurs Aa et Cc étant respectivement proportionnelles aux nombres n_1 et n_2 de spires sur chaque bobinage.

2° *Force électromotrice aux bornes du secondaire.* — 183. Ce sera la différence géométrique entre e_2 et la perte de charge dans le bobinage secondaire. Son impédance se réduit à sa résistance ohmique r_2 : car,

étant admis que la dispersion magnétique est nulle, et que par suite le seul flux agissant est Φ_m, la seule force électromotrice induite dont cette partie du circuit secondaire puisse être le siège sera e_2. On se retrouve ici dans les conditions déjà signalées pour le cas de l'induit d'un alternateur (§ 86).

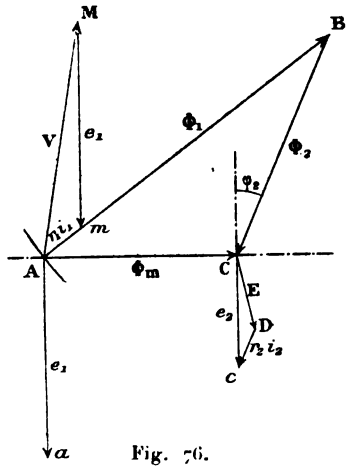

Fig. 76.

Si le circuit d'utilisation ne comporte que des récepteurs sans self, la perte de charge sera (fig. 75) $c\mathrm{D} = r_2 i_2$, et il restera, comme force électromotrice E disponible aux bornes, CD différence arithmétique entre e_2 et $r_2 i_2$. Dans le cas général d'un décalage φ_2 (fig. 76), on mènera $c\mathrm{D} = r_2 i_2$ parallèlement à la direction CB, et la force électromotrice E sera figurée par le troisième côté CD du triangle.

3° *Différence de potentiel aux bornes du primaire.* — 184. La force électromotrice effective qui produit le courant d'intensité i_1 dans le circuit primaire, est la somme géométrique de la force électromotrice V appliquée aux bornes, et de la force électromotrice de réaction e_1.

Portant sur AB, direction de i_1, la longueur $\mathrm{A}m = r_1 i_1$, et menant mM égale et parallèle à aA, on obtiendra suivant AM le vecteur de la différence de potentiel aux bornes V.

Pratiquement, r_1 est assez faible pour que $r_1 i_1$ soit négligeable devant les valeurs de V et de e_1; il en résulte que ces deux forces électromotrices peuvent être considérées comme très sensiblement en opposition.

Il en résulte que le décalage de E par rapport à V sera de même égal à 180° toutes les fois que le circuit secondaire ne comportera pas de self, ou encore lorsque l'intensité i_2 sera assez faible pour qu'on puisse considérer la perte de charge $r_2 i_2$ comme négligeable.

185. — Cette propriété peut être mise à profit pour permettre de substituer, aux bornes des wattmètres ou des compteurs destinés à mesurer la puissance fournie sous haute tension, la force électromotrice E à la force électromotrice V réellement agissante.

La puissance à mesurer ayant pour valeur :

$$W_1 = Vi_1 \cos \varphi_1,$$

celle indiquée dans ces conditions par le wattmètre sera :

$$W_2 = Ei_1 \cos (\pi + \varphi_1) = - Ei_1 \cos \varphi_1.$$

On peut d'ailleurs poser, ainsi que nous le verrons par la suite :

$$E = kV$$

k désignant une constante, à la condition que l'état de charge du transformateur varie peu.

D'où, en valeur absolue :

$$W_2 = kW_1,$$

et la constante de l'appareil tiendra compte du facteur k.

La self de la bobine en dérivation n'est pas, il est vrai, négligeable, mais l'intensité du courant qui la traverse est toujours assez faible, pour que l'on puisse considérer comme négligeable la perte de charge qu'elle occasionne dans le secondaire du transformateur, et ce dernier pourra n'avoir qu'une puissance très faible, à la condition qu'il n'alimente aucun autre récepteur.

Principes généraux du fonctionnement. — 186. La condition fondamentale à laquelle doit tout d'abord satisfaire le transformateur est évidemment que l'énergie empruntée au réseau primaire se retrouve intégralement (sauf le taux normal de perte consentie), dans le circuit secondaire.

Cette condition pourrait en principe se trouver réalisée alors même que l'intensité i_1 au primaire conserverait une valeur numérique constante, quelle que fût la demande de courant au secondaire ; le calage de i_1 par rapport à V variant seul en fonction de la puissance. Mais un semblable état de choses serait évidemment très défectueux, puisqu'il nécessiterait le fonctionnement permanent de toutes les unités génératrices, quel que fût le degré d'utilisation des moteurs. Il faudra donc, en second lieu, que le circuit primaire n'emprunte à chaque instant au réseau qu'une intensité de courant sensiblement proportionnelle à celle qu'exigent le nombre et la nature des récepteurs actuellement en fonction sur le réseau secondaire.

En troisième lieu, si la différence de potentiel V aux bornes du réseau primaire est maintenue constante, ainsi que c'est le cas général, il faudra qu'il en soit très sensiblement de même pour E, quelles que soient les variations de charge imposées au transformateur tant que celle-ci demeurera dans les limites de la puissance pour laquelle il a été établi ; ce qui revient à dire que E doit satisfaire à la relation :

$$E = kV.$$

Nous allons voir comment sont remplies ces trois conditions ; pour simplifier, nous prendrons le cas où le circuit d'utilisation ne comporte pas de self ; nous étudierons ensuite l'influence du décalage au secondaire.

1° Transformation de l'énergie. — 187. Soit, comme précédemment, ABC le triangle des flux : soient (fig. 77) :

$$Am = r_1 i_1$$

la perte de charge dans le circuit primaire (nous exagérons son importance afin de rendre la figure lisible) ;

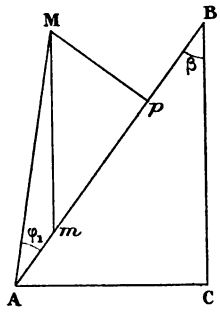

Fig. 77.

$$AM = V$$

et

$$Mm = e_1$$

φ_1 l'angle de décalage de i_1 par rapport à V, et β l'angle ABC.

Projetons M en p sur AB : on a :

$$Ap = Am + mp$$

d'où :

$$V \cos \varphi_1 = r_1 i_1 + e_1 \cos \beta.$$

Multipliant par i_1 les deux membres :

$$(1) \qquad V i_1 \cos \varphi_1 = r_1 i_1^2 + e_1 i_1 \cos \beta.$$

Le triangle rectangle ABC donne :

$$\cos \beta = \frac{n_2 i_2}{n_1 i_1},$$

d'autre part :

$$e_1 = e_2 \cdot \frac{n_1}{n_2},$$

d'où :

$$(2) \qquad V i_1 \cos \varphi_1 = r_1 i_1^2 + e_2 i_2,$$
$$e_2 i_2 = V i_1 \cos \varphi_1 - r_1 i_1^2,$$

soit :

W_2	$= W_1$	$- r_1 i_1^2$
Puissance récupérée au secondaire.	Puissance dépensée au primaire.	Puissance perdue par effet-joule au primaire.

On retrouve donc au secondaire toute la puissance fournie au primaire, moins la fraction perdue par effet Joule dans le bobinage primaire. Il ne faut pas oublier que nous faisons pour l'instant abstraction des actions parasites :

Des deux relations (1) et (2), on déduit :

$$e_2 i_2 = e_1 i_1 \cos \beta$$

ce qui montre que l'énergie récupérée est, comme dans le cas des moteurs, égale au travail de la force électromotrice induite agissant comme antagoniste de la force électromotrice appliquée aux bornes.

Quant à la puissance effectivement disponible aux bornes du secondaire, elle sera évidemment égale à W_2, moins la chaleur produite par effet Joule dans le bobinage secondaire, toujours en négligeant les actions parasites.

2° Intensité du courant primaire ; courant magnétisant. — 188. Le diagramme des flux montre que le flux résultant Φ_m est le même, dans les conditions effectives de fonctionnement, que si, le circuit primaire existant seul, le courant qui le traverse avait l'intensité :

$$i_m = \frac{AC}{Kn_1}.$$

Soient i_{1w} et i_{1d} les composantes wattée et déwattée par rapport à V de l'intensité primaire i_1 : on aura :

$$(1) \qquad i_1^2 = (i_{1w})^2 + (i_{1d})^2,$$

$$(2) \qquad i_{1w} = i_1 \cos \varphi_1.$$

Le triangle rectangle ABC donne les relations :

$$(3) \qquad (n_1 i_1)^2 = (n_2 i_2)^2 + (n_1 i_m)^2$$

et :

$$(4) \qquad n_2 i_2 = n_1 i_1 \cos \beta.$$

Comme d'ailleurs l'angle β est sensiblement égal à φ_1, on peut écrire :

$$n_2 i_2 = n_1 i_{1w}$$

soit :

$$(5) \qquad i_{1w} = \frac{n_2}{n_1} i_2$$

et :

$$n_1^2(i_{1w}^2 + i_1 d^2) = (n_1 i_w)^2 + (n_1 i_{1m})^2$$

d'où l'on déduit :

$$(6) \qquad i_{1d} = i_{1m}.$$

On voit ainsi que, lorsqu'il n'y a pas de décalage au secondaire, la composante wattée du courant primaire varie proportionnellement à la valeur de l'intensité au secondaire (relation 5) ; tandis que la composante déwattée peut être considérée comme produisant l'aimantation alternative du noyau de fer.

Ce dernier courant, que l'on appelle courant magnétisant, joue donc, dans le cas actuel, exactement le même rôle que le courant d'excitation d'une génératrice quelconque, dynamo ou alternateur ; à rendement égal, leur ordre de grandeur relative sera sensiblement le même.

A ce titre, il doit être considéré à part, et l'on voit que la condition énoncée au paragraphe 186 est remplie pour la composante i_{1w}. Nous verrons par la suite que i_m peut pratiquement être considérée comme constante, tout au moins entre les limites normales de la charge.

L'identité qui existe à ce point de vue entre les conditions de fonctionnement du transformateur et celles d'une génératrice proprement dite, apparaîtra plus nettement si l'on prend le cas de $n_1 = n_2$. On a alors, toujours dans l'hypothèse d'un décalage nul au secondaire :

$$i_{1w} = i_2$$

Or, une génératrice débitant le courant i_2 prendra pour son excitation un certain courant i_e ; de même, le transformateur absorbe dans le même but le courant i_m ; le courant i_{1w} pouvant, puisque l'on a $i_2 = i_{1w}$, être considéré comme passant directement au réseau d'utilisation.

3° Constance du rapport $\frac{E}{V}$. — 189. On a :

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Si les résistances ohmiques des circuits primaire et secondaire sont assez faibles pour qu'on puisse négliger les pertes de charge correspondantes, on aura :

$$e_1 = V$$
$$E = e_2$$

d'où :

$$\frac{V}{E} = \frac{n_1}{n_2}.$$

C'est à cette condition seulement que pourra être réalisée la constance du rapport $\frac{V}{E}$; celle-ci ne peut donc être que relative ; d'autres causes interviennent d'ailleurs pour la troubler. Pratiquement, l'écart entre le voltage à pleine charge et le voltage à vide peut, sans inconvénient atteindre 2 p. 100 pour les conditions de chaque calage moyen au secondaire.

Rapport de transformation. — 190. C'est le rapport $\frac{n_1}{n_2}$: ce sera donc très approximativement aussi le rapport de la différence de potentiel V à la valeur de la force électromotrice E aux bornes du secondaire ; quant aux intensités primaire et secondaire, les considérations précédentes montrent que leurs valeurs seront dans le

rapport inverse, tout au moins en supposant remplies les conditions spéciales que nous avons admises comme première approximation.

Représentation graphique de la variation de l'intensité primaire. — 191. Si l'on admet que la perte de charge ohmique $r_1 i_1$ dans le circuit primaire est pratiquement négligeable, le même degré d'approximation permettra de considérer comme constante la valeur de la force électromotrice e_1, différence géométrique entre la force électromotrice constante V aux bornes, et $r_1 i_1$.

Il en sera par suite de même pour la valeur :

$$\Phi_m = -\frac{e_1}{n_1 \omega}$$

du flux dans le circuit magnétique du transformateur.

L'expérience justifie cette conclusion, en démontrant que la perte par hystérésis est très sensiblement indépendante de l'état de charge, ce qui exige la constance de l'induction $\mathfrak{B}$ dans le fer, et par suite celle de Φ_m.

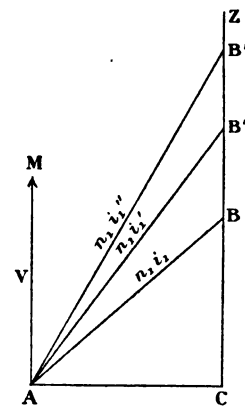

Fig. 78.

La longueur AC demeurant invariable, le point B décrira, lorsque i_2 varie, la droite CZ (fig. 78), et le courant i_1 au primaire variera proportionnellement à la longueur AB. Son angle de décalage φ_1 par rapport à V diminue donc au fur et à mesure que la charge augmente : à pleine charge, il est très voisin de o ; nous verrons plus loin que l'influence des actions parasites, jusqu'à présent laissées de côté, ne lui permet pas de prendre la valeur 90° indiquée par le diagramme dans le cas de la marche à vide.

Puissance transformée. — 192. La puissance transformée peut indifféremment être mesurée par l'un ou par l'autre des produits égaux :

$$W_1 = e_1 i_1 \cos \varphi_1$$

ou :

$$W_2 = e_2 i_2.$$

Or, on a :

$$BC = n_1 i_1 \cos \varphi_1 = n_2 i_2$$
$$= W_1 \frac{n_1}{e_1} = W_2 \frac{n_2}{e_2}$$

et comme nous venons de voir que e_1 et e_2 sont pratiquement des constantes, il en résulte que la puissance $W_1 = W_2$ sera, pour chaque valeur du courant i_2 au secondaire, mesurée par la longueur BC correspondante, à l'échelle de $\frac{e_1}{n_1}$ unités de longueur par watt.

Effets du décalage au secondaire. — 193. Supposons que le courant au secondaire soit décalé d'un angle φ_2 de retard par rapport à la force électromotrice e_2, son intensité restant égale à i_2. Le vecteur CB (fig. 79), tournera autour du point C pour venir en CB′ ; et AC conservant d'autre part, en vertu de la même hypothèse que précédemment, une valeur constante, le troisième côté du triangle sera AB′ ; il en résulte que l'intensité au primaire s'est accrue de la quantité $\frac{B'b}{n_1}$.

On voit donc que, pour une même valeur i_2 de l'intensité dans le circuit secondaire, le courant primaire nécessaire pour que le flux Φ_m demeure constant sera d'autant plus grand que le décalage φ_2 aura lui-même une valeur plus grande.

Il est facile de s'expliquer ce fait. Le décalage introduit dans le circuit secondaire une composante dévattée i_{2d} en opposition avec le courant magnétisant i_m : les ampères-tours $n_2\ i_{2d}$ correspondant retranchent donc leur action de celle des ampères-tours primaires. Il s'ensuit que, pour que Φ_m reste constant, il faudra que le transformateur reçoive du circuit primaire un surcroît d'excitation capable de compenser l'effet démagnétisant ci-dessus : c'est-à-dire que l'on doit avoir :

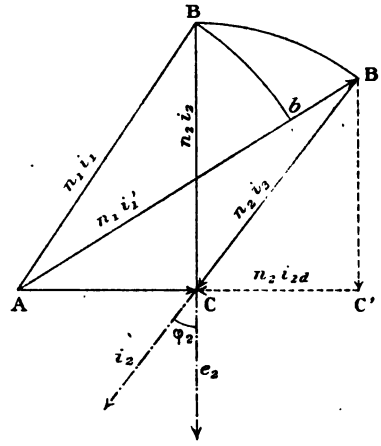

Fig. 79.

$$n_1 \Delta i_m = n_2 i_{2d}.$$

Le diagramme montre qu'en effet :

$$CC' = n_2 i_{2d}$$
$$AC' = n_1 i'_m$$

en désignant par i'_m la valeur actuelle du courant magnétisant, et :

$$AC = n_1 i_m$$

d'où :

$$CC' = AC' - AC = n_1(i'_m - i_m) = n_1 \Delta i_m$$

soit :

$$n_1 \Delta i_m = n_2 i_{2d}.$$

194. L'effet inverse se produira si le courant, au lieu d'être décalé en arrière par rapport à e_2, est au contraire

décalé en avant. La composante déwattée i_{2d} (fig. 80) est alors de même sens que le courant magnétisant primaire, lequel, pour une valeur de Φ_m donnée, diminuera par suite de la quantité Δi_m telle que :

$$n_1 \Delta i_m = n_2 i_{2d}.$$

Dans l'un et l'autre cas, la valeur du rapport $\frac{i'_1}{i'_2}$ de l'intensité primaire à l'intensité secondaire variera avec celle de l'angle φ_2 : la relation mentionnée au paragraphe 190 ne subsiste donc plus dès qu'il existe un décalage au secondaire. Nous allons voir que, dans les conditions réelles caractérisées par l'existence de dérivations ou fuites magnétiques, le rapport des forces électromotrices aux bornes du primaire et du secondaire est également variable.

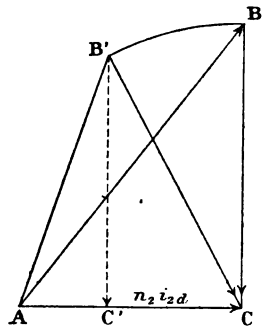

Fig. 80.

Effets de la dispersion magnétique. — 195. Nous avons jusqu'à présent admis que les deux bobinages, primaire et secondaire, limitaient un flux rigoureusement constant, égal à la différence géométrique de flux respectivement engendrés par les ampères-tours primaires et secondaires.

En réalité, il n'en est pas ainsi. Un certain nombre de lignes de force, débordant en quelque sorte du canal destiné à les contenir, sortent de l'espace occupé par le fer, pour venir se fermer dans le milieu ambiant. Cette dispersion a pour cause principale la répulsion qu'exercent l'un sur l'autre les deux flux Φ_1 et Φ_2, sensiblement de sens opposés, qu'engendrent séparément les bobinages primaire et secondaire.

La composition de ces flux, telle que nous l'avons faite, suppose qu'ils suivent un parcours commun ; ceci n'est vrai que pour une partie, la plus importante d'ailleurs, de leurs lignes de force respectives, lesquelles se fondent alors pour constituer le flux Φ_m commun aux deux bobinages. Les autres, dérivées dans des circuits distincts, conservent une existence individuelle caractérisée par ce fait qu'elles se groupent suivant deux flux Φ'_1 et Φ'_2 coïncidant en phase avec les courants i_1 et i_2.

On est donc en présence de trois flux distincts :

1° Le flux Φ_m, commun à toutes les spires, tant secondaires que primaires, engendrant dans chacune d'elles la force électromotrice considérée précédemment e.

2° A travers les spires du bobinage primaire, le flux Φ'_1 et à travers celle du bobinage secondaire, le flux Φ'_2 coïncidant respectivement en phase avec les courants i_1 et i_2, et engendrant par suite des forces électromotrices e_{s1}, e_{s2} dans chacun de ces deux circuits.

196. Il est évident que la présence d'une force électromotrice de self-induction dans le bobinage secondaire aura pour effet, en augmentant sa résistance apparente, de restreindre pour une valeur donnée e_2 de la force électromotrice induite, celle de la force électromotrice E disponible aux bornes du réseau secondaire. Soit (fig. 81) $Cc = e_2$; menons $cD = r_2 i_2$, $DD' = e_{s2}$: la force électromotrice disponible aux bornes du réseau sera figurée par CD'; s'il n'y avait pas eu de self en circuit, elle aurait eu la valeur CD.

D'autre part, dans le circuit primaire, la force électromotrice e_{s1} ajoutant géométriquement son action à celle de la force électromotrice e_1 antagoniste de la différence de potentiel V appliquée aux bornes, il en résulte que, pour des valeurs données de V et de i_1, la valeur de e_1, et par suite aussi celle de e_2, seront plus faibles que s'il ne se produisait pas de dispersion.

Décrivons (fig. 81) un arc de cercle du point A comme centre avec V pour rayon ; prenons, sur AB, $Am = r_1 i_1$, et, sur la perpendiculaire à Am, $mm' = e_{s1}$. La force électromotrice e_1 étant dirigée suivant la perpendiculaire à AC sera figurée par $m'M'$; elle serait égale à Mm dans le cas d'une dispersion nulle.

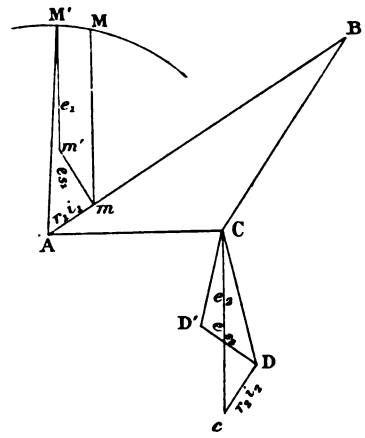

Fig. 81.

On voit donc que les effets de la dispersion dans les deux circuits concourent à restreindre la force électromotrice E aux bornes du réseau secondaire en diminuant, d'une part, la force électromotrice génératrice e_2, et, d'autre part, en augmentant la perte de charge dans le circuit secondaire. Comme ces effets croissent avec la charge imposée au transformateur, c'est-à-dire avec les valeurs du flux Φ_1 et Φ_2, il en résulte que la valeur du rapport $\frac{E}{V}$ sera elle-même variable avec cette charge.

Diagramme des forces électromotrices ; détermination expérimentale des forces électromotrices de self-induction. — 197. Nous supposerons, pour simplifier, que les bobinages primaire et secondaire sont identiques, le rapport de transformation étant dès lors égal à 1. Soient (fig. 82) $AB = r_2 i_2$, $BC = e_{s2} = \omega L_2 i_2$: la perte de charge totale dans le bobinage secondaire sera $AC = \mathfrak{R}_2 i_2$. Si, du point C comme centre avec e_2 (force électromotrice induite au secondaire) comme rayon, on décrit un arc de cercle coupant BA prolongée en O, le vecteur OA

représentera la force électromotrice E aux bornes du secondaire pour le cas où le décalage dans le circuit extérieur est nul ; si le décalage est égal à φ, la valeur de la force électromotrice E sera $O_\varphi A$.

En négligeant dans le circuit primaire le courant

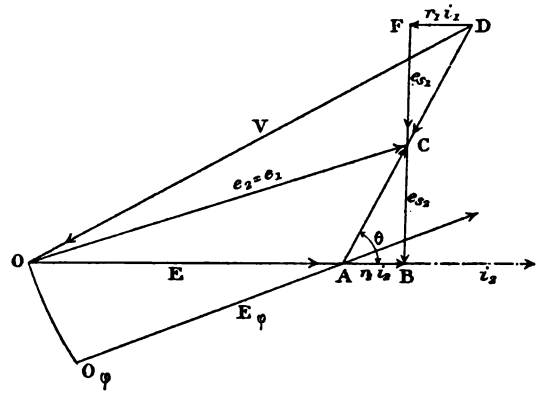

Fig. 82.

magnétisant i_m, très faible comparativement au courant i_2 tant que le transformateur fonctionne dans les conditions de puissance pour lesquelles il a été établi (voir § 206), on aura $i_1 = i_2$, et les courants primaire et secondaire seront exactement à 180° l'un de l'autre.

Prolongeant AC de la longueur égale CD, cette dernière représentera donc la perte de charge dans le circuit primaire. Comme d'ailleurs la différence de potentiel V aux bornes est la somme géométrique de $e_1 = e_2$ figurée par CO, et de $\mathfrak{R}_1 i_1 =$ DC, on aura :

$$DO = V.$$

198. Le diagramme montre tout d'abord que la force électromotrice aux bornes du secondaire, E = OA, peut être considérée comme la différence géométrique entre la

différence de potentiel V = OD aux bornes du primaire, et la somme AD = AC + CD des pertes de charge dans les deux bobinages.

199. Pour une intensité du courant donnée, la longueur BF = $e_{s1} + e_{s2}$, soit = $2e_{s1}$ dans le cas actuel, sera d'autant plus grande qu'il y aura plus de dispersion magnétique. M. Kapp a indiqué une méthode qui permet d'apprécier celle-ci par la détermination expérimentale des forces électromotrices de self-induction, e_{s1}, e_{s2}, à la condition que l'on dispose d'un rhéostat ou d'un moyen quelconque permettant de faire varier dans des limites assez étendues la différence de potentiel aux bornes du primaire.

Cette dernière ayant été préalablement amenée à sa valeur minima, on ferme le secondaire en court-circuit sur un ampèremètre, et l'on augmente progressivement l'intensité du courant au primaire, jusqu'à ce que l'ampèremètre indique que le courant dans le court-circuit a atteint l'intensité qui correspond aux conditions de fonctionnement à pleine charge. Soit V la valeur à cet instant de la différence de potentiel aux bornes du primaire : le diagramme précédent montre que E étant nulle par suite du court-circuit, le point O se confondra avec A, et par suite :

$$V = DA.$$

Comme d'ailleurs les pertes de charge ohmiques AB et DF dans les deux bobinages sont toujours très faibles, les longueurs DA et FB peuvent être considérées comme différant très peu. Il en résulte que l'on peut écrire :

$$V = e_{s1} + e_{s2} = 2e_{s1}$$

soit :

$$e_{s_1} = \frac{V}{2}$$

Dans le cas général où les deux bobinages ne comportent pas le même nombre de spires, la relation ci-dessus s'appliquera encore au bobinage primaire. Comme d'ailleurs on peut admettre que la force électromotrice de self-induction est proportionnelle au nombre des spires, on aura pour ce qui concerne le secondaire :

$$e_{s2} = \frac{n_2}{n_1} = e_{s1} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{V}{2}.$$

Connaissant les intensités au primaire et au secondaire, on déduit leurs coefficients de self-induction des relations :

$$e_{s1} = \omega L_1 i_1$$
$$e_{s2} = \omega L_2 i_2$$

les valeurs ainsi trouvées s'appliquant exclusivement aux conditions de charge de l'expérience.

Chutes de tension dans le transformateur. — 1° *En fonction de la dispersion magnétique.* — 200. Par chute de tension dans le transformateur, nous entendons la différence $E_0 - E$ entre la force électromotrice théorique E_0 donnée par la relation :

$$E_0 = \frac{n_2}{n_1} V$$

et la force électromotrice E effectivement disponible aux bornes du secondaire.

Cette quantité varie, toutes choses étant égales d'ailleurs :

1° D'un transformateur à un autre, avec les valeurs de leurs dispersions respectives ;

2° Pour un transformateur donné, avec l'intensité du courant et son calage par rapport à E.

Comme elle est d'ailleurs complètement indépendante du rapport de transformation, il n'y a aucun inconvénient à choisir le cas particulier où ce rapport est égal à 1 ; nous resterons donc dans les conditions spécifiées pour l'établissement du diagramme précédent, en ne perdant pas de vue qu'il ne s'applique qu'au cas où le courant débité par le transformateur est d'une intensité suffisante pour que l'on puisse négliger devant sa valeur celle du courant magnétisant i_m.

Soit, pour une intensité de courant $i_1 = i_2$, OA $=$ E

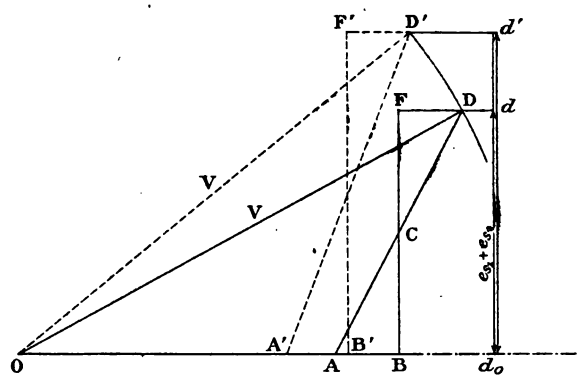

Fig. 83.

(fig. 83) la force électromotrice que développe le secondaire d'un transformateur donné aux bornes du circuit d'utilisation ne comportant pas de self. Prenons un second transformateur de même résistance ohmique, mais donnant lieu à une dispersion plus grande, de telle sorte que la somme $e_{s1} + e_{s2}$ des forces électromotrices de self-induction au lieu d'être, comme dans le cas précédent, égale à d_0d, soit actuellement égale à d_0d' pour les mêmes conditions de charge.

Menons d'F' parallèle à dF, et, à partir du point D' intersection de cette droite avec la circonférence de centre O et de rayon V, portons D'F' $=$ DF $= r_1i_1$.

Abaissant du point F′ la perpendiculaire F′B′ sur OA, et prenant B′A′ = BA = $r_2 i_2$, nous obtiendrons la valeur OA′ = E′ de la force électromotrice disponible aux bornes du second transformateur ; de telle sorte que la longueur AA′ représentera le surcroît de chute de tension qu'occasionne à intensité égale la dispersion plus grande dans cet appareil.

2° *En fonction de l'intensité du courant, pour un décalage donné de i_2 par rapport à E.* — 201. Si l'on admet qu'entre certaines limites de la charge, la dispersion varie d'une manière insignifiante avec celle-ci, l'angle θ = BAC (fig. 82) qui est l'angle de réactance :

$$\theta = \text{arc tg} \frac{\omega L}{r}$$

de l'un et de l'autre bobinage, sera constant pour un transformateur donné.

Il en résulte que dans le triangle ODA, le côté DA dont

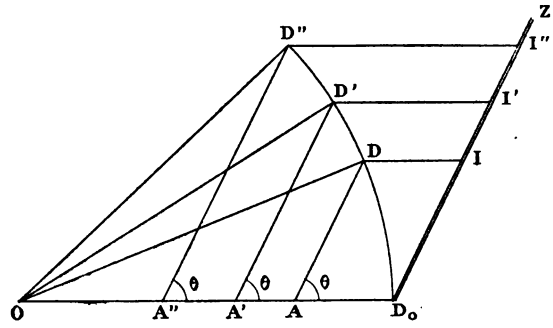

Fig. 84.

la longueur mesure la somme des pertes de charge dans les deux circuits, possédera une direction invariable. Etant proportionnel à la somme $i_1 + i_2$ des intensités, soit, dans le cas actuel, à $2i_2$, il pourra représenter en grandeur l'intensité au secondaire.

Considérons d'abord le cas où le courant i_2 est en phase avec E. V est constant par hypothèse : le point D se déplacera donc sur la circonférence ayant O pour centre et V pour rayon. Du point D_0 (fig. 84), menons D_0Z parallèle à DA, et portons sur cette droite, à partir de D_0, les longueurs D_0I, D_0I', D_0I'' proportionnelles aux intensités croissantes i_2, i'_2, i''_2 : les valeurs correspondantes de la force électromotrice E seront respectivement OA, OA', OA'' déterminées comme l'indique le diagramme ; les chutes de tension ont donc pour valeurs successives D_0A, D_0A', D_0A''.

Soit maintenant φ l'angle de décalage de i_2 par rapport

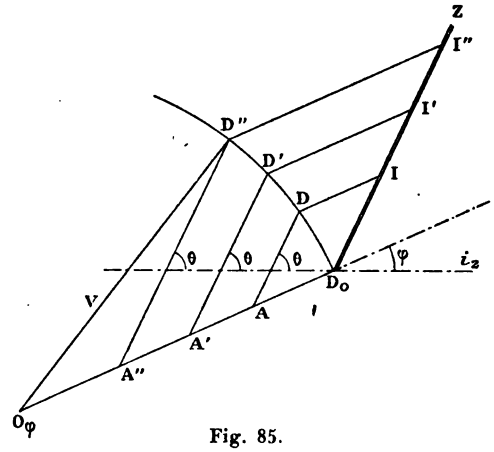

Fig. 85.

à E. Traçons la droite $D_0\,O_\varphi$ faisant avec la direction du courant l'angle φ (fig. 85), et de longueur $= D_0O = V$. Le rapport de transformation étant égal à 1, la longueur D_0O_φ mesurera, comme D_0O dans le cas précédent, la valeur $E_0 = V$ de la force électromotrice à vide. Le lieu des points D sera actuellement la circonférence ayant O pour centre et V pour rayon, et si l'on porte les intensités successives D_0I, D_0I', D_0I'' sur la droite D_0Z ayant

même direction que précédemment, les valeurs correspondantes de E seront $O_\varphi A$, $O_\varphi A'$, $O_\varphi A''$, et les chutes de tensions par suite seront mesurées par les longueurs D_0A, D_0A', D_0A''.

3° *En fonction du décalage pour une intensité donnée.* — 202. Soient (fig. 86) ODA le triangle des forces électro-

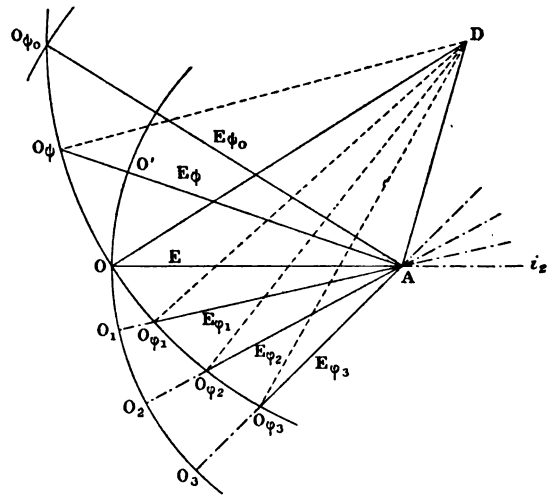

Fig. 86.

motrices pour $\varphi = 0$. L'intensité étant constante, il en sera de même de la longueur DA.

Décrivons du point D la circonférence ayant V pour rayon : les vecteurs représentant E pour chaque valeur φ du décalage auront l'une de leurs extrémités en A et l'autre sur cette circonférence.

Pour comparer les valeurs successives E_φ de E à celle, mesurée par AO, qui correspond à un décalage nul, décrivons, du point A comme centre avec AO pour rayon, une deuxième circonférence. On voit immédiatement qu'à chaque valeur telle que φ_1 du décalage en arrière correspondra une chute de tension mesurée par la distance $O_1O_{\varphi 1}$

comptée sur AO_{ψ_1}, des deux circonférences, et augmentant avec le retard de phase.

Par contre, si le courant au lieu d'être décalé en arrière par rapport à la force électromotrice E se trouve en avance de phase, *il se produira un accroissement de la tension initiale* AO *aux bornes du secondaire.* On voit en effet que, pour une valeur quelconque ψ de l'angle d'avance, la force électromotrice correspondante E_ψ a la valeur AO_ψ, plus grande que AO′ de la longueur $O'O_\psi$ mesurant le survoltage qui résulte de l'avance de phase ψ.

Pour une valeur convenable ψ_0 de cet angle, on aura :

$$E_{\psi_0} = V = E_0 \text{ (force électromotrice à vide)}$$

le décalage en avant du courant dans le réseau annulant dès lors toute chute de tension dans le transformateur ; et si ψ croît au-dessus de cette valeur, la tension aux bornes deviendra plus grande que la force électromotrice à circuit secondaire ouvert.

Ainsi, une avance de phase du courant secondaire par rapport à la force électromotrice E pourra, dans le cas général, augmenter la valeur *théorique* $\frac{n_2}{n_1}$ du coefficient de transformation des forces électromotrices. On vérifie en particulier ce fait lorsque le transformateur alimente un moteur synchrone surexcité (voir § 220) : il peut surprendre au premier abord, car on est, en pratique, plus habitué à voir se produire des baisses que des élévations de tension.

203. La dispersion magnétique est le facteur de beaucoup le plus important qui, dans les conditions ordinaires de la pratique, puisse contribuer à faire varier la tension aux bornes du secondaire, surtout lorsque le courant dans le réseau est assez fortement décalé. Dans certains cas, notamment lorsqu'il s'agit de mettre en

marche des moteurs asynchrones, la chute de tension occasionnée de ce fait prend une telle importance qu'il devient dès lors nécessaire d'employer un transformateur beaucoup plus puissant que le récepteur considéré ; aussi, lorsque la mise en marche d'un moteur asynchrone est laborieuse, ce n'est pas toujours dans les conditions d'établissement du moteur, mais assez souvent dans celles du transformateur qui l'alimente, qu'il faut en rechercher la cause : tel type de transformateur qui convient à l'éclairage par incandescence pouvant être, du fait d'un excès de dispersion, tout à fait impropre à ce dernier emploi.

Hystérésis et courants de Foucault. — 204. Une partie de l'énergie électrique fournie au transformateur par le réseau primaire est transformée sur place en chaleur par suite de l'hystérésis du noyau de fer (§ 38), et des courants induits dans l'ensemble des pièces métalliques entrant dans la construction du transformateur.

Il en résulte qu'à circuit ouvert le courant au primaire ne se réduit pas à la composante déwattée i_m : il comporte en outre une composante wattée d'intensité i_{0w} telle que le produit $e_1 \times i_{0w}$ représente la puissance électrique transformée en chaleur dans l'appareil. Tout se passe dès lors comme si le circuit secondaire, au lieu d'être ouvert, se trouvait fermé sur une résistance ohmique r_0 limitant l'intensité à une valeur i_{02} telle que :

$$e_2 i_{02} = e_1 i_{0w}$$

En désignant par i_{01} l'intensité totale dans le circuit primaire :

$$i^2_{01} = i^2_{0w} + i^2_m$$

on aura (fig. 87), pour les conditions de fonctionnement à vide :

$$A_0C_0 = n_1 i_m$$
$$A_0B_0 = n_1 i_{01}$$

et le troisième côté B_0C_0 représentera la valeur des ampères-tours fictifs $n_2\ i_{02}$.

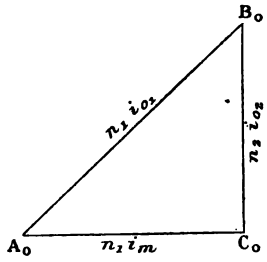

Fig. 87.

205. La puissance W_h dissipée par hystérésis ne dépend (§ 38) que de l'induction maxima $\mathfrak{B}$ du fer et de la fréquence du courant ; comme le flux Φ_m et par suite $\mathfrak{B}$ varient très peu entre les limites de puissance pour lesquelles le transformateur a été établi, W_h sera pratiquement indépendante de son état de charge. Il en est sensiblement de même pour la puissance W_f correspondant aux courants de Foucault ; on peut dès lors admettre que les conditions fictives énoncées pour le cas du fonctionnement à vide subsistent quelle que soit la charge ; de telle sorte que, pour tenir compte des actions parasites de ce genre dans la théorie du fonctionnement, on pourra leur substituer l'effet d'une dérivation, de résistance ohmique r_0, établie en permanence entre les bornes du circuit secondaire ; ce qui revient à augmenter dans tous les cas de la quantité i_{02} l'intensité i_2 effectivement débité dans le circuit secondaire, en tenant compte de ce que i_{02} est en phase avec e_2.

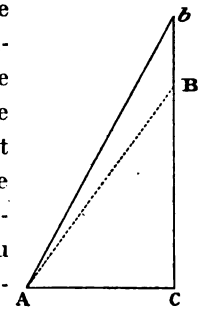

Fig. 88.

Ainsi, dans le cas où il n'existe pas de décalage au secondaire, le côté CB devra, quelle que soit sa longueur

propre, être prolongé de la longueur constante Bb = $n_2 i_{02}$ (fig. 88) ; si le courant i_2 est décalé par rapport à e_2, la longueur Bb devra être portée perpendiculairement à la direction AC, en sorte que les ampères-tours résultant seront (fig. 89) représentés par la longueur Cb.

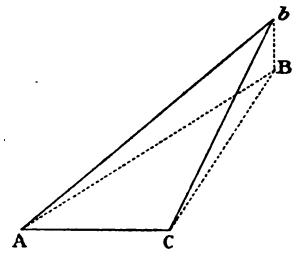

Fig. 89.

Conditions pratiques de fonctionnement. — 206. La nécessité de rendre les figures lisibles ne nous a pas permis de tenir compte, dans le tracé des diagrammes précédents, des grandeurs relatives des vecteurs.

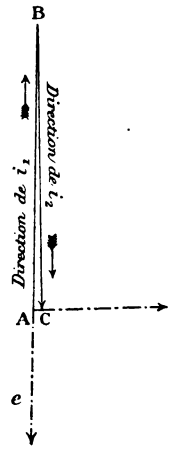

Fig. 90.

Ainsi, dans le triangle ABC des flux (fig. 75 et 76) le côté AC est, pour les conditions normales de charge, très petit comparativement aux deux autres, car le courant magnétisant i_m n'atteint généralement pas 2 p. 100 de l'intensité maxima au primaire. La forme réelle du diagramme se rapproche donc de celle indiquée figure 90, et l'angle CAB est dès lors assez voisin de $\frac{\pi}{2}$ pour que l'on puisse admettre que les courants i_1 et i_2 soient calés à 180° l'un de l'autre.

Il en résulte en outre que, dans ces conditions, on pourra sans erreur sensible considérer que, sauf dans le cas de charges faibles, le rapport $\frac{i_2}{i_1}$ des intensités primaire et secondaire est constant, et égal à l'inverse $\frac{n_1}{n_2}$ de celui des forces électromotrices correspondantes.

207. Comme l'angle de décalage des forces électromotrices V et E est lui-même très voisin de 180°, les courant primaire et secondaire seront donc sensiblement décalés du même angle par rapport aux forces électromotrices aux bornes de leurs circuits respectifs. On voit ainsi que la présence dans le circuit secondaire de récepteurs doués de self produira dans le circuit primaire à peu près le même décalage que si ce dernier les alimentait directement.

En particulier, à pleine charge et pour un décalage nul au secondaire, le facteur de puissance sera pratiquement égal à 1 dans le circuit primaire.

A vide, la valeur moyenne de cos φ est 0,70, soit environ 45° pour l'angle de décalage. La composante wattée du courant i_1, correspondant à la puissance absorbée par actions parasites, est donc à peu près égale à la composante déwattée, ou courant magnétisant i_m.

208. Pour une différence de potentiel V constante aux bornes du primaire, la valeur de la force électromotrice E aux bornes du secondaire varie, ainsi qu'il ressort des considérations précédentes, avec les conditions de charge.

La chute de tension à pleine charge est, en moyenne, de 2 à 3 p. 100, lorsque le transformateur n'alimente que des résistances non inductives, telles que les lampes à incandescence ; lorsque le courant est fortement décalé en arrière, comme dans le cas d'un moteur asynchrone, où le facteur de puissance descend à la valeur 0,50, la chute de tension peut, avec certains transformateurs en usage, atteindre 15, et même 20 p. 100, suivant l'importance de la dispersion.

Inversement, si le transformateur alimente un moteur synchrone, la tension au secondaire pourra être survoltée dans la même proportion.

Mécanisme du fonctionnement. — 209. L'autorégulation réalisée dans le transformateur, et consistant dans ce fait que toute variation Δi_2 de l'intensité dans le circuit d'utilisation entraîne une variation proportionnelle $\frac{n_1}{n_2}\Delta i_1 = \Delta i_2$ de l'intensité primaire, résulte de l'action démagnétisante des ampères-tours secondaires.

En effet, la force électromotrice induite au primaire

$$e_1 = -\omega\Phi_m \times n_1$$

qui, agissant comme antagoniste de la différence de poten-

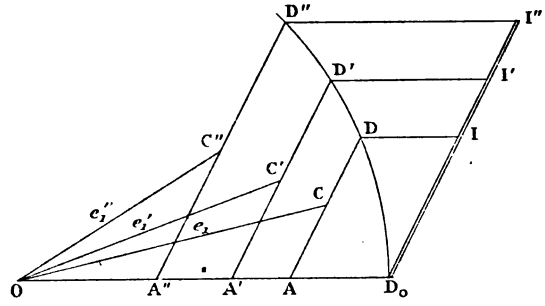

Fig. 91.

tiel aux bornes du primaire, limite à chaque instant l'intensité du courant dans ce circuit, varie avec les conditions de charge ; les diagrammes des figures 84 et 85 complétés (fig. 91 et 92) par l'adjonction des vecteurs O_2C, O_2C' figurant cette force électromotrice mettent ce fait en évidence. On peut donc se rendre compte de l'action régulatrice ci-dessus en considérant que l'appel du courant au primaire, corrélatif d'un accroissement Δi_2 du débit dans le circuit d'utilisation, a pour cause la modification qu'apporte cet accroissement Δi_2 dans l'état magnétique du fer, caractérisé par la valeur de son induction :

$$\mathcal{B}_m = \frac{\Phi_m}{S}$$

210. Au point de vue théorique, ceci paraît en contradiction avec le fait précédemment admis que le flux magnétisant Φ_m conserve une valeur constante : l'expé-

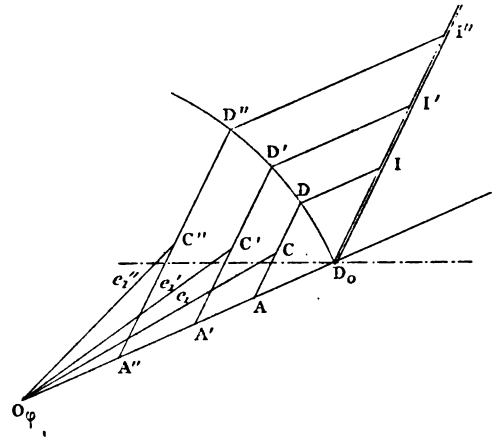

Fig. 92.

rience démontre d'ailleurs que les pertes par hystérésis, et par suite la valeur $\mathfrak{B}_m$, peuvent être considérées comme indépendantes de la charge. Mais il n'y a en réalité là qu'une question d'ordre de grandeur relative des facteurs en présence : si, d'une part, la variation de Φ_m est assez faible pour pouvoir être négligée dans tous les cas où, par suite de l'importance très prépondérante d'autres actions, ses effets ne modifieraient que d'une manière tout à fait insignifiante le résultat final, par contre il ne saurait en être ainsi lorsque ce résultat dépend de facteurs présentant le même ordre de grandeur numérique que la variation considérée.

Or, dans le cas qui nous occupe, les deux facteurs qui déterminent l'intensité du courant primaire sont la force électromotrice effective ε, différence géométrique de V et de e_1, et la résistance R_1 du circuit primaire. Comme la perte de charge occasionnée par cette der-

nière possède, dans tous les cas de charge normale, une valeur numérique extrêmement faible comparativement à celle de V, il suffira d'une variation également très faible de ε, et par suite *a fortiori* de e_1, pour que l'intensité i_1 varie de la valeur correspondant au fonctionnement à vide à celle qui caractérise la pleine charge, et la variation correspondante de la force électromotrice aux bornes du secondaire pourra être insignifiante.

Prenons pour exemple le cas suivant.

Soient :

$$V = 3000$$
$$i_1 = 4 \text{ ampères à pleine charge}$$
$$= 0{,}12 \text{ à vide}$$
$$R_1 = 5 \text{ ohms.}$$

A pleine charge, on aura :

$$\mathcal{E} = 4 \times 5 = 20^{\text{V}}$$

soit, comme V et e_1 sont alors sensiblement en opposition :

$$e_1 = V - \mathcal{E} = 2980 \text{ V.}$$

à vide :

$$\mathcal{E}' = 5 \times 0{,}12 = 0{,}6$$

soit, comme valeur *inférieure* de e'_1 (puisque dans ce cas e'_1 est $> V - \varepsilon'$, par suite de la différence des phases).

$$e'_1 = 2999{,}4.$$

Entre la marche à vide et la marche à pleine charge, la variation de e_1 n'est donc que de $19^{\text{v}},4$, soit d'environ 0,6 p. 100 de sa valeur maxima.

Si le rapport de transformation est égal à 25, on aura

pour les valeurs correspondantes de la force électromotrice induite au secondaire :

$$e_2 = 119,2$$
$$e'_2 = 119,7$$

et l'on voit que la chute de tension dans le secondaire résultant de la variation de e_1 entre les limites ci-dessus est pratiquement négligeable.

211. En résumé, la variation du flux magnétisant, qui permet à l'intensité primaire de varier proportionnellement à la demande de courant dans le circuit d'utilisation, est extrêmement faible, et peut, lorsqu'il s'agit de toute autre question que celle-ci, être négligée.

Cette action régulatrice peut être rapprochée de celle qui, dans une machine à vapeur, s'opère par l'intermédiaire du régulateur de vitesse Dans ce dernier cas, *il faut que la vitesse varie en fonction de la charge* pour que le régulateur modifie parallèlement les conditions de puissance : et cependant, la vitesse pourra pratiquement, si le régulateur est assez sensible, *être considérée comme constante* pour tous les états de charge, parce qu'il suffira dès lors de très faibles variations de cette vitesse pour que la puissance varie d'une manière théoriquement indéfinie. La légère démagnétisation du fer qui produit un appel de courant au primaire est comparable au ralentissement de la machine, déterminant de même un appel de vapeur dans le cylindre ; mais l'ordre de grandeur du premier phénomène est encore, en général, très inférieur à celui de la variation de vitesse dans une machine motrice.

CHAPITRE VI

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

Différents types de moteurs alternatifs. — Moteurs synchrones; puissance en fonction du décalage ; stabilité de marche ; influence du taux d'excitation : intensité minima pour une puissance donnée ; effets de la surexcitation. — Mise en marche. — Moteurs-dynamos. — Moteurs d'induction : principes généraux de leur fonctionnement ; champs tournants ; expression du couple moteur en fonction du glissement ; décomposition d'un champ alternatif simple en deux champs tournants : application aux moteurs monophasés. — Constitution du moteur ; procédés usuels de démarrage ; réversibilité des machines asynchrones.

Convertisseurs de courant alternatif en continu ; commutatrice. — Principe général ; intensité du courant dans l'induit ; influence des pertes ; décalage. — Panchahuteur Hutin et Leblanc.

Moteurs à courants alternatifs. — 212. Tandis que les moteurs à courant continu, basés sur un principe uniforme, ne diffèrent en réalité que par des points de détail, par contre les moyens mis en œuvre pour obtenir par courants alternatifs un couple moteur sont beaucoup plus variés. Abstraction faite des moteurs polyphasés dont l'étude n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage, il existe trois catégories tout à fait distinctes de moteurs alternatifs à simple phase :

1° *Les moteurs synchrones.* — Nous avons déjà vu qu'un alternateur quelconque peut indifféremment fonctionner en génératrice ou en réceptrice, suivant que la

phase de sa force électromotrice avance ou retarde sur celle de la différence de potentiel aux bornes du réseau.

Le fonctionnement d'un moteur de ce genre est caractérisé par la constance absolue de sa vitesse, quelle que soit la charge, tant que celle-ci n'entraîne pas un décalage en arrière excédant l'angle limite de stabilité (§ 154), auquel cas le moteur s'arrête.

Sa mise en fonction nécessite la même préparation que lorsqu'il s'agit d'une génératrice : il faut le mettre en mouvement, l'exciter à un voltage à peu près égal à celui du réseau, puis l'amener à une vitesse voisine du synchronisme, et enfin, choisir pour le coupler sur le réseau l'instant où la phase de sa force électromotrice induite est en coïncidence avec celle de la différence de potentiel aux bornes du réseau. On peut toutefois simplifier la manœuvre au moyen d'artifices de démarrage dont il sera parlé plus loin.

L'excitation des inducteurs exige naturellement que l'on dispose d'une source de courant continu.

2° *Les moteurs-dynamo, ou moteurs série.* — On sait que l'on ne change pas le sens de rotation d'un moteur à courant continu, excité en dérivation ou en série, lorsqu'on intervertit le sens du courant qui l'alimente. Il en résulte qu'en principe une dynamo pourra fonctionner en réceptrice aux bornes d'un circuit à courants alternatifs ; nous verrons plus loin les restrictions qu'il y a lieu d'apporter à ce mode de fonctionnement.

Un moteur de ce genre n'est astreint à aucune condition de vitesse : il démarre par suite spontanément. Il n'exige d'autre courant que le courant alternatif fourni par le réseau.

3° *Moteurs d'induction ou moteurs asynchrones.* — Ces moteurs sont de véritables transformateurs rotatifs, constitués par un circuit primaire, généralement fixe, et par un circuit secondaire, fermé en court-circuit sur lui-

même, qui forme la partie tournante. Le courant dans ce dernier circuit est induit par la variation du flux engendré par les ampères-tours du circuit primaire, ou inducteur, alimenté par le réseau.

La possibilité de supprimer toute prise de courant mobile est, au point de vue pratique, une particularité intéressante de ces moteurs.

Le couple moteur est nul au repos : il faut donc lancer le moteur avant de le mettre en circuit. La vitesse en marche normale peut varier entre une valeur maxima un peu inférieure à la vitesse correspondant au synchronisme, et une valeur minima variable d'un type à l'autre.

Elle diminue avec la charge imposée au moteur jusqu'à cette dernière valeur, au delà de laquelle le moteur s'arrête, comme le moteur synchrone.

1° **Moteurs synchrones.** — *Conditions générales de fonctionnement.* — 213. Ainsi que nous l'avons vu précédemment (§ 152), l'expression générale de la puissance d'un alternateur est, en considérant comme négligeable la résistance ohmique de son induit :

$$W = E \frac{V}{\omega l} \sin \alpha$$

E désignant la force électromotrice induite de l'alternateur ;

α le décalage de cette force électromotrice par rapport à la différence de potentiel V aux bornes du réseau ;

l le coefficient de self de son induit.

Pour α compris entre O et π ($\sin \alpha > o$), on a $W > o$, il y a production de travail électrique, et la machine fonctionne en génératrice.

Pour α compris entre π et 2π ($\sin \alpha < o$), $W < o$, il y a dépense de travail électrique transformé en travail dans la machine fonctionnant comme moteur.

214. *Stabilité.* — Si l'on maintient l'excitation, et par suite E, constantes, la courbe figurative de l'équation :

$$W = K \sin \alpha$$

sera, lorsque α varie de π à 2π, le cercle OD′ (fig. 65, § 154). En convenant, pour le cas spécial qui nous occupe, de compter l'angle α dans le sens des retards de phase, les limites de variation de cet angle seront dès lors o et π. Nous voyons que, tant que α n'aura pas atteint la valeur $\frac{\pi}{2}$, la puissance motrice, mesurée par la longueur ON, augmentera avec le retard, c'est-à-dire avec la charge imposée au moteur. Celui-ci est donc autorégulateur, et le régime est stable jusqu'à cette limite du décalage en arrière.

Un accroissement de charge produisant un retard de plus de 90° aura pour effet immédiat le *décrochage* du moteur, car, à partir de cette valeur du décalage, la puissance motrice diminuant avec le retard de phase, celui-ci ira constamment en augmentant jusqu'à la valeur $\alpha = 180°$, pour laquelle le couple moteur est nul. Le moteur s'arrêtera donc forcément.

Au fur et à mesure que α augmente, le degré de *stabilité* diminue (voir § 161).

Influence du taux d'excitation. — 215. Le moteur fonctionnant dans des conditions données de charge, correspondant à une puissance W invariable, voyons ce qui se passe lorsqu'on fait varier l'excitation de ses inducteurs.

L'équation :

$$E = W \frac{\omega l}{V} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} = \frac{K'}{\sin \alpha}$$

est alors, en coordonnées polaires, celle d'une droite $C_0 C_n$ (fig. 93) parallèle au vecteur OB relatif à V et distante de OB d'une longueur égale au facteur constant $K' = W \frac{\omega l}{V}$.

On voit tout d'abord que, pour une puissance donnée,

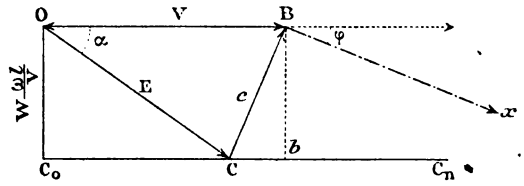

Fig. 93.

le calage de E par rapport à V, c'est-à-dire le retard plus ou moins grand du moteur, est fonction du taux d'excitation, et que ce retard *s'accroît* lorsqu'on diminue l'excitation, *diminue* au fur et à mesure qu'on l'augmente. Le réglage de l'excitation peut donc modifier les conditions de stabilité.

216. En outre, ce réglage permet de faire varier l'intensité du courant alimentant le moteur, jusqu'à la valeur minima exigée par les conditions de charge. La force électromotrice e qui détermine cette intensité est, pour chaque valeur de E et de α, la différence géométrique entre V et E (fig. 93). Comme nous admettons que la résistance ohmique de l'induit est négligeable devant sa self, il en résulte que le courant dans cet induit sera décalé de 90° en arrière de e : son vecteur aura donc la direction Bx, faisant l'angle φ avec OB. La valeur de l'intensité :

$$I = \frac{e}{\omega l}$$

pourra être représentée en grandeur, à l'échelle de $\frac{1}{\omega l}$, par le segment BC $= e$.

Ceci posé, nous savons tout d'abord que le retard α ne pouvant excéder 90°, la plus petite valeur que l'on puisse attribuer à l'excitation sans déterminer l'arrêt du moteur sera telle que :

$$E = OC_0 = W\frac{\omega l}{V}$$

Si maintenant on augmente l'excitation à partir de la

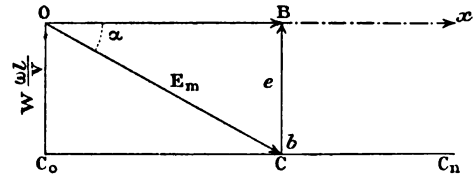

Fig. 94.

valeur précédente, on voit que l'on arrivera à attribuer à E une valeur déterminée E_m pour laquelle le courant sera en phase avec la différence de potentiel V (fig. 94).

Pour toute valeur de E inférieure à E_m, le courant était

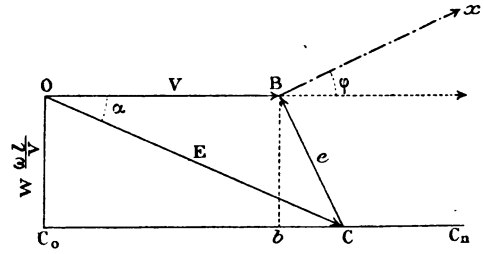

Fig. 95.

en retard de phase sur V (fig. 93), si on continue à accroître l'excitation de manière à attribuer à E des valeurs $> E_m$, la phase du courant *prendra l'avance sur celle de la différence de potentiel aux bornes* (fig. 95). Ce fait est extrêmement caractéristique, car le moteur synchrone est, de

tous les récepteurs actuellement en usage, le seul qui présente cette particularité de pouvoir occasionner un décalage en avant du courant qui l'alimente; il se comporte, à ce point de vue spécial, de la même manière qu'un condensateur en dérivation, et nous verrons plus loin que cette propriété peut être mise à profit dans la pratique.

Pour $E = E_m$, le vecteur CB est perpendiculaire à OB, d'où :

$$E_m = \frac{V}{\cos \alpha}$$

et il en résulte que e, et par suite I ont alors la plus faible valeur possible.

Ce résultat était d'ailleurs facile à prévoir, car, dans le cas général, on a :

$$I = \frac{I_w}{\cos \varphi}$$

I_w désignant la composante de l'intensité wattée par rapport à V, c'est-à-dire telle, que :

$$I_w = \frac{W}{V}$$

Or, cette valeur I_w est déterminée par les conditions de charge imposées au moteur, et c'est par suite la plus petite valeur que puisse prendre l'intensité du courant pour une puissance W donnée.

217. Il importe de remarquer que la force électromotrice E induite dans le moteur peut excéder très notablement la valeur V de la différence de potentiel appliquée à ses bornes. D'une manière générale, le mode de fonctionnement d'un alternateur est déterminé, non par une relation de grandeur entre la force électromotrice

induite et la différence de potentiel aux bornes du réseau auquel il est relié, mais uniquement par une relation de phase : l'alternateur fonctionnant toujours (c'est-à-dire, bien entendu, tant qu'il reste au synchronisme) comme générateur d'énergie électrique lorsque sa force électromotrice présente une avance de phase par rapport à V, et toujours comme moteur dans le cas inverse. Le maximum possible de E n'est, dans le cas actuel, déterminé que par les conditions d'établissement du moteur.

218. En augmentant l'excitation, on diminue l'angle de retard α et l'on accroît par suite la stabilité de la marche, mais c'est au détriment de l'utilisation et du rendement du moteur, car l'intensité du courant qu'il emprunte au réseau dans des conditions de puissance donnée augmentera constamment avec la force électromotrice induite, à partir de la valeur $E_m = \frac{V}{\cos\alpha}$ de celle-ci.

En définitive, et sauf le cas où l'on se proposerait plus spécialement de faire produire par le moteur synchrone un décalage du courant en avant de la force électromotrice de la source, le réglage de son excitation devra tendre à attribuer au courant qui l'alimente la plus petite valeur possible, l'ampèremètre servant de moyen de contrôle. Le rendement et l'utilisation du moteur sont alors maxima, puisque son échauffement est réduit au minimum pour une puissance donnée.

En manœuvrant le rhéostat d'excitation dans le sens des excitations décroissantes, on peut arriver à déterminer le décrochage du moteur ; la manœuvre inverse ne pourra qu'accroître la stabilité.

Mise en marche ; excitation. — 219. Pour amener le moteur à la vitesse du synchronisme, on peut, ou bien le commander par un moteur asynchrone de faible puissance, facile à mettre en marche : tel, par exemple,

qu'une dynamo-série, que l'on mettra hors service aussitôt le moteur relié au réseau ; ou encore employer des artifices spéciaux, tels que la production d'un champ tournant (voir § 224), dispensant de l'emploi d'un moteur auxiliaire. Certaines applications peuvent d'ailleurs fournir des solutions spéciales ; par exemple, si le moteur synchrone actionne une dynamo chargeant des accumulateurs, on pourra, pour la mise en phase, utiliser cette dernière comme moteur alimenté par le courant de la batterie.

Dans ce cas spécial, l'excitation des inducteurs peut être empruntée à la dynamo elle-même ; en général, il faudra disposer d'une excitatrice spéciale, à moins qu'on ne redresse une fraction du courant alternatif alimentant le moteur. Il est en tout cas indispensable, pour les raisons qui viennent d'être énoncées, d'avoir un rhéostat en série sur le courant d'excitation, tout au moins pour des moteurs d'assez grande puissance.

220. Lorsqu'un moteur synchrone est alimenté par du courant transformé à basse tension, on constate parfois qu'au moment de la mise en circuit le voltage monte aux bornes du secondaire du transformateur. Ceci résulte de ce que les inducteurs étaient surexcités, et que le courant dans le moteur se trouvant dans ces conditions décalé en avant, son action dans le bobinage secondaire est alors d'accroître le flux magnétisant au lieu de le diminuer, comme le ferait un courant décalé en arrière (§ 194 et 202).

Cette action est d'ailleurs toute locale et n'entraîne pas un accroissement du potentiel primaire : c'est simplement le rapport de transformation $\frac{E}{V}$ (§ 202), qui se trouve modifié.

Le même fait se produira au cours de la marche si l'on surexcite le moteur. Il est toutefois plus facile à mettre

en évidence lorsque le moteur fonctionne sans charge, car, pour une excitation donnée, le décalage en avant sera d'autant plus grand que la charge est plus faible, ainsi que le montre le diagramme (fig. 95).

2° ***Moteurs dynamos.*** — 221. Une dynamo excitée en série peut fonctionner comme moteur sur un réseau de courants alternatifs, à la condition, très essentielle, que le fer de ses inducteurs soit divisé comme celui de l'induit, afin d'éviter ou tout au moins de réduire les courants de Foucault. Abstraction faite de la question de rendement, le moteur fonctionnera comme s'il était alimenté par un courant continu, puisque les couples successivement engendrés pendant chaque demi-période conservent le même sens : le courant étant renversé à la fois et au instant dans l'inducteur et dans l'induit.

En particulier, il pourra démarrer en charge, et c'est le seul, des trois types de moteurs monophasés, qui remplisse cette condition.

L'importance des actions parasites et le faible rendement qui en résulte font par contre que c'est le moins susceptible d'une application générale. Son emploi se limite au cas d'un fonctionnement intermittent, mettant en jeu de faibles puissances pendant de courtes périodes de marche : ascenseurs, démarrage de moteurs plus puissants, etc.

La question de rendement a dès lors peu d'importance, et l'absence de toute complication dans la mise en marche justifie pleinement son emploi dans ces cas très spéciaux.

222. Une dynamo excitée en dérivation ne saurait en général être employée dans le même but : car le principe du fonctionnement exige que les inversions de courant se produisent exactement au même instant dans l'inducteur et dans l'induit ; il faut donc que les constantes de temps

de ces deux circuits soient égales, s'ils doivent constituer deux dérivations distinctes.

Cette condition n'est pas irréalisable, mais on ne voit pas très bien l'intérêt pratique que pourrait présenter dans le cas actuel ce mode d'excitation. Étant donné que le seul avantage que présente en somme le moteur dynamo est de pouvoir démarrer en charge, il y a évidemment intérêt à réaliser le couple le plus puissant possible au démarrage, et l'excitation-série doit à ce titre être préférée.

3° ***Moteurs d'induction.*** — 223. Le principe de fonctionnement de ce genre de moteur peut être considéré

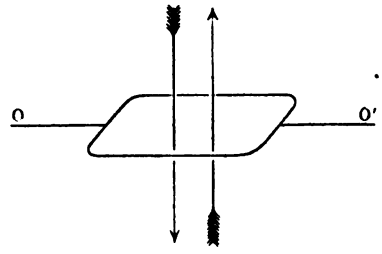

Fig. 96.

comme un cas particulier du principe général qui régit la marche de tous les moteurs *à champ tournant* plus spécialement employés avec des courants à phases multiples. Nous nous bornerons ici à faire un exposé succinct de la question.

Soit S une spire fermée sur elle-même et mobile autour d'un axe OO' (fig. 96). Placée dans un champ alternatif de direction constante, cette spire prendra, comme on sait, une orientation déterminée par rapport à la direction des lignes de force du champ, et restera immobile cette position une fois atteinte. Mais supposons que l'on fasse tourner le système inducteur autour du même arc OO' :

la spire, tendant à conserver par rapport au champ la même position relative que précédemment, l'accompagnera dans son déplacement ; elle sera par suite entraînée avec une certaine vitesse angulaire ω' qui aura pour valeur maxima possible la vitesse ω du champ, la différence $\omega - \omega'$ mesurant la vitesse du déplacement relatif dans le champ, ou *glissement* de la spire considérée.

224. Pratiquement, on peut, sans déplacement matériel du système inducteur, réaliser la condition ci-dessus par certaines combinaisons de champs périodiques de phases

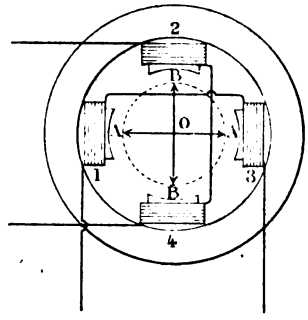

Fig. 97.

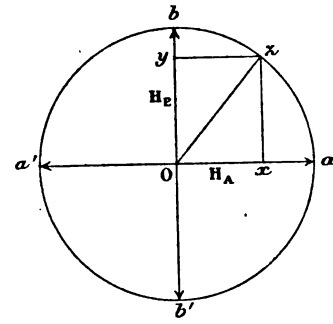

Fig. 98.

différentes. Considérons par exemple les champs créés par deux systèmes inducteurs identiqnes A et B (fig. 97), ayant leurs axes à 90° l'un de l'autre et alimentés respectivement par des courants décalés d'un quart de période, les ampères-tours étant les mêmes dans les deux inducteurs. L'intensité H_A du premier champ en un point quelconque O varie en passant par zéro entre le maximum positif + H mesuré par la longueur O*a* (fig. 98), et le maximum négatif — H mesuré par O*a'* ; de telle sorte que si l'on représente par O.*x* sa valeur à un instant quelconque *t*, le point *x* décrira la droite *aa'* dans le temps T, durée d'une période.

De même, O*b* figurant le maximum de l'intensité H_B au

même point, maximum ayant même valeur H que le précédent puisque les ampères-tours sont les mêmes dans les deux systèmes, et Oy sa valeur à l'instant t, le point y décrira la droite bb'.

A chaque instant, l'intensité effective du champ au point O sera la résultante Oz des intensités Ox et Oy, et cette résultante est caractérisée par les deux propriétés suivantes :

1° Sa valeur absolue est constante et égale au maximum H des champs composants. En effet ces derniers étant en quadrature, on doit avoir :

$$\overline{Oz}^2 = \overline{Ox}^2 + \overline{Oy}^2$$

et :

$$Ox = H \sin \omega t$$
$$Oy = H \cos \omega t$$

d'où :

$$(1) \qquad Ox^2 + Oy^2 = H^2$$

d'où enfin :

$$(2) \qquad Oz = \pm H.$$

2° Sa direction décrit autour du point O un cercle dans le temps T durée d'une période. Le lieu du point z est en effet la courbe définie par l'équation (1), c'est-à-dire une circonférence ayant pour rayon Oa = Ob.

Cela étant une spire fermée ayant son axe de rotation perpendiculaire en O au plan de la figure tendra à suivre le champ dans son déplacement circulaire, sans être d'ailleurs astreinte au synchronisme. En désignant par Ω la différence $\omega - \omega'$ mesurant la vitesse du déplacement de la spire par rapport au champ, c'est-à-dire son *glisse-*

ment en arrière, on démontre (1) que le couple moteur ainsi engendré a pour expression :

$$P = f(\Omega) = a \frac{\Omega R}{R^2 + b^2\Omega^2}$$

R désignant la résistance ohmique de la spire, a et b des constantes.

La courbe figurative de la fonction $f(\Omega)$ est représen-

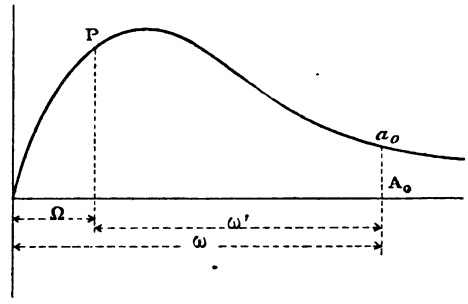

Fig. 99.

tée figure 99 ; on voit que le couple moteur, nul pour $\omega' = \omega$, augmente avec le glissement jusqu'à un maximum P_m, et décroît ensuite.

Pour $\omega' = 0$, le couple a pour valeur :

$$P_0 = a \frac{\omega R}{R^2 + b^2\omega^2}$$

c'est le couple dont on dispose pour le démarrage.

225. La réalisation d'un système semblable exige l'emploi de deux courants décalés de 90° ; dans le cas le plus général, on produit ces courants au moyen d'une génératrice spéciale possédant deux bobinages induits dans les-

(1) Voir, pour la question des champs tournants, S. THOMPSON (*Courants polyphasés*), chap. VI et VIII.

quels les phases des forces électromotrices diffèrent de un quart de période. Étant donné un réseau distribuant des courants alternatifs simples, comme ceux qui nous occupent, il serait pratiquement difficile de constituer deux dérivations dans lesquelles ces courants présenteraient ce décalage, bien qu'en principe la question puisse être résolue par l'emploi combiné de selfs et de condensateurs. Mais il n'est pas indispensable, pour produire un couple, que les courants soient décalés de 90° : deux courants décalés d'un angle quelconque, agissant dans les deux inducteurs du système précédent donneront encore naissance à un champ tournant, mais d'intensité variable.

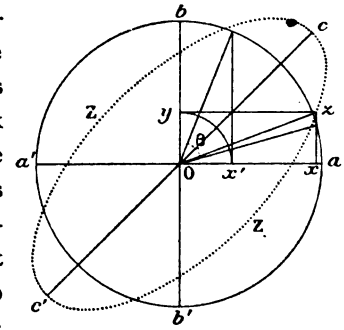

Fig. 100.

Soit β l'angle de décalage des deux courants. A l'instant t où l'intensité de l'un des champs possède la valeur Ox (fig. 100), l'autre aura la valeur Ox' ; prenant sur Ob la longueur Oy = Ox', et composant Oy et Ox, nous obtiendrons suivant Oz l'intensité au point O du champ effectif.

Pour β = 0, on aurait à chaque instant Oy = Ox, et le point z décrirait par suite la droite CC′ bissectrice de Oa et Ob ; pour tout décalage compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$, il décrira une courbe ZZ que l'on démontre être une ellipse. On obtient donc de la sorte un champ tournant dont l'intensité au point O varie entre un maximum égal au demi-grand axe de l'ellipse, et un minimum égal à son demi-petit axe.

Pour réaliser pratiquement ce système, il suffira d'attribuer aux deux circuits inducteurs des constantes de

temps différentes, ce qui s'obtiendra par exemple en disposant une résistance ohmique en série sur l'un deux.

226. On met à profit cette propriété des courants décalés pour déterminer le démarrage des moteurs branchés sur la canalisation de courants monophasés. Mais on peut, le moteur une fois lancé à une vitesse assez voisine du synchronisme, alimenter ses inducteurs par un seul courant qui suffit dès lors à engendrer le couple de rotation nécessaire pour le maintenir en mouvement, tant que la charge ne dépasse pas une certaine limite.

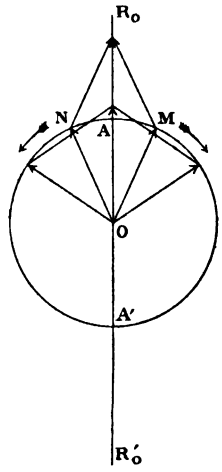

Fig. 101.

Voici la raison de ce fait :

Un champ alternatif simple peut être décomposé en deux champs de même intensité constante, tournant en sens inverse avec des vitesses respectives $+\omega$ et $-\omega$ égales (1). En effet, OM et ON représentant à un instant t les intensités respectives de ces champs en grandeur et en direction (fig. 101), leur résultante OR coïncidera constamment en direction avec la droite AA', puisque les arcs AM, AN décrits dans le même temps sont égaux. Cette résultante suit donc la loi de variation d'un champ alternatif simple (§ 224) : le point R décrit alternativement les deux segments OR_0, OR_0' égaux en grandeur absolue au double de l'intensité constante de chacun des champs tournants.

Réciproquement, tout champ alternatif OR pourra être décomposé suivant les deux champs tournants OM, ON d'intensités constantes, et égales l'une et l'autre à la moitié de son intensité maxima OR_0.

(1) Ce théorème est dû à M. LEBLANC.

Les couples qu'exercent sur une spire au repos les deux champs tournants ci-dessus, sont évidemment égaux et de sens contraires ; si, d'ailleurs, on se reporte à ce qui a été dit au paragraphe 224, on voit que l'on peut considérer que le glissement de la spire est alors ω dans l'un des champs, $-\omega$ dans l'autre, et il résulte de la relation :

$$P = a \frac{\Omega R}{R^2 + b^2\Omega^2}$$

que les couples moteurs sont alors respectivement $+P$ et $-P$. Le couple résultant est donc nul.

227. Mais il cessera d'en être ainsi, dès qu'on aura communiqué à la spire, par un moyen quelconque, une vitesse initiale $\omega' < \omega$, par exemple : car ses glissements dans l'un et l'autre champ auront dès lors les valeurs respectives $\omega - \omega'$ et $\omega + \omega'$, et celles-ci étant différentes il en sera de même des couples correspondants :

$$P = a \frac{(\omega - \omega')}{R^2 + b^2 (\omega - \omega')^2} R$$

$$P' = a \frac{(\omega + \omega')}{R^2 + b^2 (\omega + \omega')^2} R$$

Le couple résultant sera :

$$P'' = P - P'$$

Si l'on se reporte à la figure 99, on voit qu'il suffira de prolonger la courbe au delà du point a_0 pour obtenir la région correspondant aux valeurs de P'. Celles du couple résultant P'' seront par suite les différences entre les ordonnées symétriques par rapport à A_0a_0 ; elles seront mesurées par les longueurs aa' des segments limités par la courbe P et sa symétrique P' (fig. 102). Portant ces longueurs en ordonnées, on obtiendra la courbe du

couple moteur P″ en fonction du glissement de la spire dans le champ tournant dont la vitesse est + ω. C'est ce champ qui entraîne la spire ; l'action du champ tournant en sens inverse est antagoniste.

On voit immédiatement que le moteur ne saurait se maintenir à la vitesse du synchronisme : car, pour ω′ = ω, le couple moteur agit en sens inverse du mou-

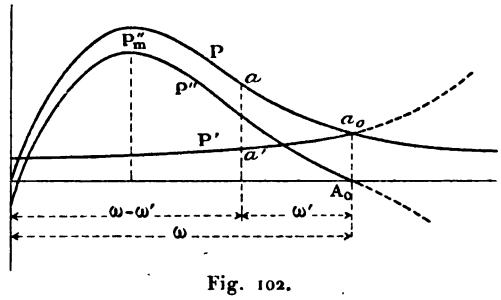

Fig. 102.

vement. Abstraction faite des résistances passives, la plus grande vitesse possible serait égale à A_0A_1 ; si le moteur était lancé à une vitesse plus grande, il ralentirait forcément sous l'influence dès lors prépondérante du couple antagoniste jusqu'à ce que l'écart entre sa vitesse et celle du champ ait acquis une valeur supérieure à OA_2.

Tant que la charge imposée au moteur est telle que le couple résistant reste inférieur au maximum P''_m, tout accroissement de charge, en augmentant le glissement, aura pour effet corrélatif un accroissement de puissance motrice. Le fait inverse se produira dès que le couple résistant aura dépassé la valeur P''_m, et le moteur ralentira dès lors jusqu'à l'arrêt ; il se décrochera comme le moteur synchrone.

Constitution du moteur. — 228. Le circuit relié à la source est bobiné autour d'un noyau feuilleté, de manière à engendrer des pôles conséquents, en nombre

variable suivant la vitesse moyenne que doit posséder la partie tournante. Celle-ci est constituée par un nombre quelconque de spires formées sur elles-mêmes. Un dispositif fréquemment employé consiste à donner à cette partie la forme d'une cage d'écureuil, les conducteurs disposés suivant les génératrices du cylindre étant réunis à leurs extrémités par des bagues qui les mettent en court-circuit.

La réluctance du circuit magnétique doit être constante, afin qu'il en soit de même du couple moteur, et aussi faible que possible pour que les fuites magnétiques soient réduites au strict minimun. Cette double considération conduit à employer le dispositif déjà en usage dans les machines Brown à courant continu, et qui consiste à noyer dans le fer les conducteurs, tant de la partie fixe que de la partie tournante. Le jeu entre les deux surfaces cylindriques peut de la sorte être rendu très faible. Néanmoins, la présence d'un entrefer conduit à attribuer aux fuites une importance toujours beaucoup plus grande que dans les transformateurs proprement dits, et une théorie complète doit en tenir compte.

229. On voit que le moteur d'induction est en définitive un transformateur dans le circuit secondaire duquel l'énergie électrique engendrée est transformée en travail mécanique. Le secondaire, ou induit, étant en permanence fermé en court-circuit sur lui-même, sera le siège de courants très intenses si le moteur vient à s'arrêter par suite d'un excès de charge entraînant le décrochage ; il en sera naturellement de même pour le circuit primaire, d'où la nécessité absolue de protéger le moteur par des coupe-circuits soigneusement calculés.

Procédés de démarrage. — 230. Dans les conditions normales de marche, le couple moteur est nul quand le moteur est arrêté ($\omega' = \omega$) : il faut donc modifier

momentanément ces conditions pour lui permettre de démarrer, et l'on met dans ce but à profit les propriétés des champs tournants, relatées aux paragraphes 224 et 225.

Supposons que le champ inducteur soit, comme l'indique la figure 97, engendré par quatre bobinages identiques 1, 2, 3, 4, dont les axes sont disposés suivant deux diamètres perpendiculaires AA, BB. En marche normale, les quatre bobines reliées en série formeront un circuit unique alimenté par le courant monophasé du réseau. Pour le démarrage, on formera avec les bobines AA d'une part, BB de l'autre, deux circuits dont on modifiera les constantes de temps primitivement égales par l'adjonction d'une self-induction dans l'un d'eux et d'une résistance ohmique dans l'autre, de telle sorte que, tous deux se trouvant établis en dérivation sur le réseau monophasé, et ayant par suite même force électromotrice appliquée à leurs bornes respectives, les courants qui les traversent soient décalés d'un certain angle. On créera ainsi un champ tournant elliptique (fig. 100) qui devra permettre le démarrage tout au moins à vide ; puis, une fois le moteur lancé à une vitesse qui, dans ces conditions, sera voisine du synchronisme, la commutation inverse rétablira le groupage primitif des quatre bobines en série. La manœuvre de mise en marche s'effectuera donc en deux temps au moyen d'un appareil permettant de réaliser successivement les deux combinaisons ci-dessus.

Si les résistances passives au démarrage sont assez réduites pour que le couple capable de les surmonter puisse résulter d'un faible décalage entre les courants dans les deux circuits, on pourra se contenter d'intercaler dans l'un deux une résistance ohmique, sans modifier la constante de temps de l'autre. La résistance ohmique supplémentaire aura pour effet de rapprocher

la phase du courant de celle de la force électromotrice aux bornes, modifiant ainsi son calage primitif comme le montre le diagramme (fig. 103).

Soient E la force électromotrice aux bornes des deux

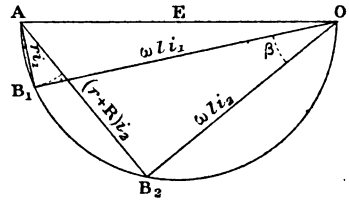

Fig. 103.

circuits, r la résistance ohmique et l le coeficient de self-induction communs aux deux bobinages, R la résistance intercalés en série sur l'un deux. Si l'on construit les deux triangles rectangles OAB_1, OAB_2 ayant $OA = E$ pour hypoténuse commune, on voit que les deux courants primitivement calés au même angle subiront, du fait de la résistance supplémentaire R, un décalage relatif mesuré par l'angle β.

Dans ces conditions, les intensités i_1 et i_2 seront forcément différentes, tandis que l'emploi combiné d'une self et d'une résistance ohmique pourra permettre de les maintenir égales, en augmentant de la même quantité les résistances apparentes de l'un et de l'autre circuit, tout en attribuant à leurs constantes de temps respectives des valeurs qui peuvent différer plus notablement que dans le premier cas, et donner par suite lieu à un décalage β plus accentué.

Enfin, l'emploi d'un condensateur en série dans l'un des circuits permettra d'accroître notablement le décalage que l'on pouvait obtenir par l'un ou par l'autre des moyens précédents ; mais ce procédé, employé à l'origine pour le démarrage des moteurs Brown, n'est plus guère en usage aujourd'hui ; en général, les dispositifs,

plus facilement réalisables, qui consistent dans l'adjonction d'une résistance et d'une self, donnent toute satisfaction.

231. On peut, d'autre part, et pour un décalage donné, accroître le couple au démarrage en augmentant la résistance ohmique de l'induit. Tant que cette résistance R conserve une valeur assez faible comparativement à celle du glissement Ω, nécessairement très grande au moment du démarrage, on peut, en négligeant R^2 devant Ω^2, réduire l'équation

$$P = a \frac{\Omega R}{R^2 + b^2 \Omega^2}$$

à la forme :

$$P = \frac{a R}{b\Omega}$$

et l'on voit ainsi que, dans les limites où l'hypothèse ci-dessus est applicable, le couple sera proportionnel à la résistance R du bobinage induit. En marche normale, la stabilité augmente également avec la valeur de R, mais c'est au détriment du rendement, et il vaut mieux, aussitôt le couplage opéré, mettre hors circuit la résistance additionnelle.

Cette modification qui doit ainsi être apportée momentanément à la constitution du circuit induit, exige que l'on puisse mettre ce dernier en relation avec l'extérieur : d'où la nécessité de faire aboutir ses extrémités à deux bagues munies de frotteurs par l'intermédiaire desquels il pourra se fermer soit en court-circuit pour la marche normale, soit sur une résistance additionnelle lors du démarrage. Le moteur perd de ce fait une partie de sa simplicité : aussi n'emploie-t-on ce dispositif qu'à partir d'une certaine puissance, la résistance passive au démar-

rage étant alors trop grande pour pouvoir être facilement surmontée par les moyens précédents seuls.

232. Tous les procédés mis en œuvre pour obtenir le démarrage des moteurs d'induction trouvent encore leur application dans le cas des moteurs synchrones, dont on modifie les circuits de manière à créer des champs tournants. La question est, dans ce dernier cas, compliquée de la nécessité de redresser une fraction du courant pour l'alimentation des inducteurs.

Réversibilité des machines asynchrones; marche en génératrice. — 233. Si l'on se reporte à la figure 102, on voit que le couple moteur P'' passe par o lorsque ω' devient égale à ω, c'est-à-dire lorsque le moteur est au synchronisme, et change de sens dès que ω' dépasse ω. Si donc, l'inducteur étant toujours alimenté par le réseau, on actionne l'induit par un moteur quelconque de manière à l'amener à une vitesse $\omega' > \omega$, la machine, au lieu d'emprunter du travail électrique au réseau, devra au contraire lui en fournir, et fonctionnera dès lors comme génératrice concurremment avec les autres unités, sans être d'ailleurs astreinte à des conditions déterminées de vitesse, pourvu que celle-ci demeure plus grande que ω. Le couple résistant et par suite le travail fourni augmentent avec la vitesse jusqu'à un maximum, puis décroissent ensuite.

234. On peut d'ailleurs se rendre compte autrement de ce fait. Ainsi que nous l'avons déjà fait observer, le moteur asynchrone n'est autre chose qu'un transformateur dans lequel l'énergie électrique engendrée au secondaire, au lieu d'être utilisée extérieurement sous diverses formes, se trouve transformée sur place en travail mécanique produisant la rotation de la partie tournante. Le courant total fourni par le réseau à l'inducteur, ou primaire, peut comme dans le cas du transformateur sta-

tique alimentant un circuit sans self, se décomposer en courant magnétisant d'intensité à peu près constante, et décalé de 90° par rapport à la différence de potentiel aux bornes, et en courant watté, d'intensité proportionnelle à la puissance fournie par le moteur, abstraction faite de l'échauffement de celui-ci.

Tant que la machine fonctionne en réceptrice, ce dernier courant est fourni par le réseau, et l'on recueille sur l'arbre un travail proportionnel à son intensité. Si, au contraire, on vient à fournir du travail mécanique à la machine en entraînant son arbre par un moteur, la transformation s'opérant en sens inverse produira de l'énergie disponible sous forme électrique, de telle sorte que l'intensité wattée I_w, au lieu d'être empruntée au réseau, lui sera au contraire cédée par la machine fonctionnant en génératrice. Mais la composante déwattée I_d du courant total dans l'inducteur devra être fournie par un alternateur ordinaire.

235. Ce genre spécial de génératrice est donc caractérisé par ce fait que le même bobinage sert dans ce cas d'inducteur et d'induit, puisqu'il *reçoit* du réseau le courant I_d nécessaire à son excitation, et *fournit* en retour le courant I_w proportionnel à la demande de puissance électrique.

On peut, de la sorte, constituer un groupe d'unités génératrices, comportant un seul alternateur synchrone, lequel devra fournir *tout le courant déwatté* exigé, non seulement par l'excitation des unités asynchrones, mais encore par les conditions du réseau extérieur, puisque les génératrices asynchrones ne débiteront que des courants en phase avec la différence de potentiel aux bornes du réseau. Ce sera donc à ces dernières que reviendra la production de toute la puissance utile.

En modifiant le mode de construction de ces machines, M. Leblanc a pu en faire de véritables génératrices, capables d'engendrer également le courant déwatté. (Voir *Éclairage électrique*, t. XVIII, p. 249 et suiv.)

Ce mode nouveau de génération n'a pas encore, à notre connaissance, fait l'objet d'applications pratiques. Il est certain qu'il paraît *a priori* des plus séduisants, étant donné que la marche des alternateurs au synchronisme est une servitude exigeant des précautions spéciales, tant au point de vue de l'établissement du matériel électrique et mécanique, qu'à celui des conditions de marche. L'avenir dira si les espérances que l'on peut dès maintenant fonder sur son emploi sont justifiées (1).

Convertisseurs ; commutatrice (2). — 236. Bien que la nature des applications actuelles de l'électricité soit telle qu'en général la plus grande part de l'énergie électrique produite dans un secteur puisse être utilisée directement sous forme de courants alternatifs, leur transformation en courant continu s'impose dans certains cas particuliers, et l'on peut dès maintenant prévoir que cette nécessité, encore à l'état d'exception, est appelée à devenir d'un ordre beaucoup plus général au fur et à mesure que se produiront de nouveaux débouchés pour l'industrie électrique.

Le problème s'est, d'ailleurs, posé dès l'origine, car c'est dans tous les cas sous forme de courants alternatifs qu'apparaît l'énergie électrique résultant d'une transformation de travail mécanique, et la dynamo continue ne diffère en principe de l'alternateur que par l'adjonction d'un organe spécial (collecteur), ayant pour effet d'opérer la commutation. En somme, entre ce dernier cas et celui qui nous occupe, la seule différence consiste en ce que cette opération doit être effectuée à distance, au lieu de l'être sur place.

---

(1) Consulter, sur ce sujet, les articles de M. LEBLANC dans l'*Éclairage électrique*, t. XVIII, p. 161, 249, 379, 488.

(2) Voir *Éclairage électrique*, t. XVIII, p. 20, 48, 322, 337, 347, 379, 389.

Les appareils établis dans ce but se nomment *convertisseurs* ou *transformateurs rotatifs*. Ils consistent le plus souvent en un groupe électrogène moteur-générateur recevant l'énergie sous forme alternative, et la restituant sous forme continue.

237. La disposition la plus élémentaire, mais la moins économique à tous points de vue, consiste à actionner une dynamo par un moteur alternatif. Ce dernier peut d'ailleurs être une dynamo semblable, au collecteur de laquelle on substituera deux bagues de prise de courant de manière à la transformer en un moteur synchrone, l'excitation des inducteurs étant empruntée au courant continu de la génératrice. Dans ces conditions, le même système inducteur pourra être employé pour les deux induits, clavetés sur le même arbre ; on évitera, d'autre part, une partie

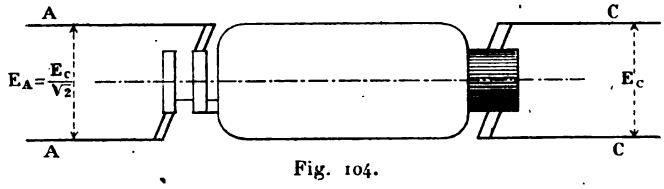

Fig. 104.

des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans le fer en les bobinant l'un et l'autre sur le même noyau.

Enfin, et c'est la solution qui paraît la plus avantageuse, un seul induit peut recevoir le courant alternatif par deux bagues, et débiter du courant continu sur son collecteur.

238. Considérons une dynamo, pouvant en principe être quelconque, mais que nous supposerons, pour fixer les idées, être bipolaire et à enroulement Gramme. Si on relie deux points diamétralement opposés de l'induit à deux bagues montées sur l'arbre (fig. 104), celles-ci présenteront une différence de potentiel alternative, de fréquence égale au nombre de tours par seconde de l'induit, et de valeur maxima égale à la valeur de la force électromotrice continue aux bornes du collecteur.

On pourra de la sorte, avec un seul induit, alimenter deux dérivations distinctes C et A distribuant, la première du courant continu, la seconde du courant alternatif, sous des tensions respectivement égales à E_c et à la valeur efficace :

$$E_A = \frac{E_c}{\sqrt{2}}.$$

Soient W_A et W_c les puissances mises en jeu dans l'une et l'autre dérivation. En désignant par W la puissance totale empruntée au moteur actionnant la dynamo, et en négligeant les pertes, on aura :

$$W = W_A + W_c$$

239. Mais la génératrice ainsi constituée est réversible, soit comme dynamo, soit comme alternateur ; la puissance motrice, au lieu d'être empruntée à une machine distincte, pourra donc avoir sa source dans l'énergie électrique transmise par l'une ou par l'autre des lignes A ou C. Dans ce cas, on aura, toujours en faisant abstraction des pertes :

$$W_A = W_c$$

l'une quelconque de ces quantités mesurant la puissance absorbée, l'autre la puissance récupérée.

En désignant par I_c l'intensité du courant dans le réseau C, par I_a l'intensité efficace du courant alternatif dans le réseau A, on aura, d'une manière générale :

$$W_c = E_c I_c$$

$$W_A = \frac{E_c}{\sqrt{2}} I_a \cos \varphi$$

φ désignant le décalage entre I_a et $E_a = \frac{E_c}{\sqrt{2}}$.

On en déduit :

$$I_c = \frac{I_a}{\sqrt{2}} \cos \varphi.$$

En particulier, si la dynamo reçoit du courant alternatif, et débite du courant continu, l'excitation pourra être réglée de manière à ce que E_a coïncide en phase avec I_a (§ 216), et les deux facteurs du courant continu seront :

$$E_c = E_a \sqrt{2}.$$

$$I_c = \frac{I_a}{\sqrt{2}}.$$

On voit donc que le rôle de la dynamo se ramène, dans dans le cas actuel, à celui d'un transformateur ayant, au point de vue quantitatif, $\sqrt{2}$ pour coefficient de transformation.

240. Le terme de transformateur rotatif s'applique donc très bien à ce dispositif; mais, pour le distinguer des précédents, on a donné à la dynamo ainsi modifiée dans son emploi, le nom spécial de *commutatrice*.

Notons, pour écarter toute équivoque, que son mode de fonctionnement ne se réduit pas à une simple *commutation* du courant, mais comporte réellement une *transformation* de l'énergie électrique fournie sous forme alternative. En effet, le mode de génération de la force électromotrice E_c est identiquement le même que s'il existait deux enroulements distincts pour chacun des courants ; dans le cas actuel, cette force électromotrice, induite par la rotation de l'anneau dans le champ, agit dans le circuit A comme antagoniste de la force électromotrice de la source alternative, et dans le circuit C comme génératrice du courant continu. La dynamo est

donc à la fois réceptrice et génératrice, et le travail mécanique est la forme intermédiaire de l'énergie transformée ; le mécanisme de la transformation est, en somme, le même dans ce dispositif que dans les précédents.

Intensité du courant dans l'induit. — 241. Le même bobinage étant à la fois le siège du courant primaire et du courant transformé, l'intensité dans une section quelconque sera à chaque instant la somme algébrique de l'intensité constante $\frac{1}{2} I_c$ et de l'intensité alternative instantanée $\frac{1}{2} i_t$.

Soient (fig. 105) ab la ligne de calage des balais sur le

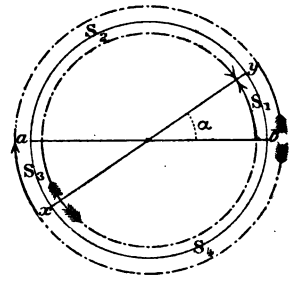

Fig. 105.

collecteur, x et y les deux points de l'induit reliés aux bagues. Le diamètre xy décrit le cercle dans le temps T d'une période ; soit, à l'instant t, α son angle avec ab.

Si a est le pôle + de la dynamo, le sens du courant I_c dans l'induit sera de b en a ; celui du courant alternatif entrant dans l'induit sera par suite de x en y, pour les valeurs de α comprises entre o et π. Il en résulte que les intensités des deux courants s'ajouteront dans les sections S_1, S_3 comprises entre b et y, x et a, et se retrancheront dans les sections S_2, S_4 comprises entre y et a, x et b.

La force électromotrice alternative aux bornes est maxima à l'instant où xy passe en ab ; le courant I_t, qui est, par hypothèse, de même phase, sera donc maximum au même instant. Son équation en fonction de α sera donc :

$$I_t = I\sqrt{2}\cos\alpha$$

soit, comme :

$$I_a = I_c\sqrt{2},$$
$$I_t = 2I_c\cos\alpha.$$

L'intensité totale à l'instant t dans les sections S_1, S_3, sera donc :

$$I = \frac{I_c}{2} + \frac{I_t}{2} = I_c\left(\frac{1}{2} + \cos\alpha\right)$$

et dans la section S_2, S_4 :

$$I' = \frac{I_c}{2} - \frac{I_t}{2} = I_c\left(\frac{1}{2} - \cos\alpha\right)$$

242. Si l'on cherche quel est l'échauffement de l'induit pour une intensité I_c du courant débité, on trouve qu'il est plus grand dans le cas actuel que dans celui du fonctionnement de la même dynamo comme simple génératrice, ce qui n'a rien d'étonnant, étant donné le double rôle de la commutatrice. Par contre, du fait qu'une partie des deux courants s'annule, résulte que la perte par effet-Joule sera moins grande qu'elle ne le serait si les courants étaient localisés dans deux bobinages distincts ; il en est par suite de même pour les pertes par courants de Foucault dans le fer et dans le cuivre ; quant aux pertes par hystérésis, elles seront évidemment plus faibles dans ce dispositif que dans l'un quelconque des

précédents qui, à puissance et à induction magnétique égales, comporteront un volume total de fer forcément plus grand.

Influence des pertes ; décalage. — 243. La relation :

$$I_c = \frac{I_a}{\sqrt{2}}$$

est basée sur l'hypothèse :

$$W_c = W_A$$

faisant abstraction des pertes, c'est-à-dire supposant le rendement égal à l'unité.

Comme en réalité, on aura toujours :

$$W_A > W_c$$

et que d'autre part la relation entre les forces électromotrices :

$$E_a = \frac{E_c}{\sqrt{2}}$$

ne dépend que de l'hypothèse sinusoïdale admise une fois pour toutes, l'intensité I_a devra forcément avoir une valeur un peu plus grande que la précédente.

En outre, pour une valeur quelconque de l'excitation déterminant (§ 216) un décalage φ entre E_a et I_a, l'intensité dans le circuit A sera, à puissance égale, non plus I_a, mais $\frac{I_a}{\cos \varphi}$.

Cet accroissement d'intensité peut, dans le cas particulier qui nous occupe, être évité par un réglage convenable de l'excitation. Mais si l'on se propose de réaliser la

transformation inverse du courant continu en courant alternatif, le calage de ce dernier sera déterminé par la self-induction du réseau et des récepteurs alimentés par la commutatrice. Ce mode d'emploi présente d'ailleurs moins d'intérêt que le premier, car les avantages spéciaux que présentent les courants alternatifs au point de vue du transport de l'énergie à longue distance font qu'il y aura en général tout intérêt à les produire au lieu même où l'on dispose d'une puissance motrice, chute d'eau ou machines à vapeur.

Panchahuteur Hutin et Leblanc. — 244. MM. Hutin et Leblanc ont réalisé un appareil basé sur un principe tout différent.

Supposons un transformateur dont le circuit primaire est alimenté, comme dans le cas général, par le courant alternatif fourni par le réseau, mais dont le secondaire comporte un nombre de spires variable d'un instant à l'autre suivant la loi sinusoïdale. Dans ces conditions, le rapport de transformation, au lieu d'être une constante, sera lui-même variable en fonction du temps, et la force électromotrice induite pourra, inversement, posséder une valeur constante ; le circuit relié aux bornes du secondaire sera donc le siège d'un courant continu.

L'étude détaillée de cet appareil est complexe : nous renverrons, pour sa description, à l'article paru dans *l'Electricien* (1894, t. VII)

CHAPITRE VII

DISTRIBUTION DES COURANTS ALTERNATIFS

Résistance ohmique des conducteurs aux courants alternatifs. — Self-induction des circuits; résistance apparente, facteur d'impédance. — Causes contribuant à accroître la self-induction des circuits : influences de la constitution du milieu ambiant, de l'écartement des conducteurs et de leur diamètre, de la fréquence du courant. — Perte de charge en ligne et tension utilisable à l'extrémité. — Câbles concentriques : capacité ; répartition des potentiels; coupure du circuit sur le câble extérieur ; effet Ferranti. — Pertes d'énergie dans les canalisations. — Modes de distribution des courants alternatifs : transformateurs isolés; sous-stations. — Pertes résultant du fonctionnement en permanence de l'ensemble des transformateurs. — déwattage du courant; moyens théoriques d'y remédier : condensateur et moteur synchrone.

Résistance ohmique des conducteurs aux courants alternatifs. — 245. La perte de charge dans un conducteur donné sera, à intensité égale, plus grande si le courant est alternatif que s'il était continu. Ceci tient à ce que, dans le premier cas, la densité du courant dans chaque élément *ds* de la section du conducteur, au lieu d'être constante comme lorsque le courant est continu, va en décroissant de la périphérie au centre ; de telle sorte que tout se passe comme si une partie seulement de la section totale participait à la transmission du courant.

La grandeur de cet effet dépend de la fréquence du cou-

rant et du diamètre du conducteur ; si l'on désigne par R_a et R_c les résistances qu'oppose un même conducteur aux courants alternatif et continu, on a, d'après M. Potier :

$$\frac{R_a}{R_c} = 1 + \frac{1}{12}\frac{l^2}{R^2_c}\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 - \frac{1}{180}\frac{l^4}{R^4_c}\left(\frac{2\pi}{T}\right)^4 + \ldots$$

Dans cette expression, l représente la longueur du conducteur. Si l'on remplace dans le second membre R_c par sa valeur :

$$R_c = \rho\frac{l}{\pi d^2}$$

(ρ résistance spécifique du métal, d diamètre du conducteur), on voit que l s'élimine et que, pour un métal donné, le rapport $\frac{R_a}{R_c}$ variera en fonction du facteur $\frac{d^2}{T}$. Voici, pour le cas du cuivre, les valeurs de ce rapport pour $\frac{d^2}{T}$ compris entre 0 et 32 000 :

$\frac{d^2}{T}$	$\frac{R_a}{R_c}$	$\frac{d^2}{T}$	$\frac{R_a}{R_c}$
0	1,0000	1 620	1,8628
20	1,0000	2 000	2,0430
80	1,0001	2 420	2,2190
180	1,0258	2 880	2,3937
320	1,0805	5 120	3,0956
500	1,1747	8 000	3,7940
720	1,3180	18 000	5,5732
980	1,4920	32 000	7,3250
1 280	1,6778		

246. Avec les fréquences en usage, cet effet est sensiblement négligeable tant que le diamètre du conducteur ne dépasse pas 1 centimètre, ainsi qu'on peut s'en rendre

compte d'après les chiffres du tableau suivant, déduits des données précédentes :

DIAMÈTRE d	$\frac{R_c}{R_a}$ FRÉQUENCE 40	$\frac{R_c}{R_a}$ FRÉQUENCE 80
1	1,0000	1,0001
2	1,0207	1,0805
3	1,1005	1,3180
4	1,2650	1,6778
5	1,5000	2,0430

On voit que, pour une fréquence de 40 périodes par seconde, la résistance ohmique du conducteur est accrue de 50 p. 100 lorsque son diamètre atteint 5 centimètres ; pour 80 périodes, elle est alors doublée.

Cet accroissement de résistance peut, en général, être considéré comme négligeable lorsqu'il s'agit des circuits d'alternateurs ou de transformateurs, constitués, soit avec du fil de faible diamètre, soit, lorsque l'intensité du courant nécessite de fortes sections, avec des rubans larges, mais de faible épaisseur. Il n'en est plus ainsi pour les câbles de canalisation, et l'on peut dans ce cas avoir avantage à substituer aux conducteurs pleins des tubes, dont la section sera mieux utilisée, ou encore à répartir le courant total entre plusieurs conducteurs au lieu d'en employer un seul de section équivalente.

Self-induction des circuits. — 247. Si l'on considère le circuit fermé constitué (fig. 106) par l'induit d'une génératrice A, un récepteur quelconque B et les conducteurs C qui les réunissent, cette dernière partie du circuit sera, comme les deux premières, le siège d'une force électro-

motrice induite par les variations du flux qu'engendre à travers la section limitée par les deux conducteurs l'intensité périodique du courant qui les traverse. L'expression de cette force électromotrice sera donc, en désignant

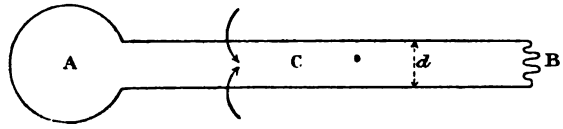

Fig. 106.

par L le coefficient de self-induction de cette partie du circuit total, et par I l'intensité efficace du courant :

$$e_s = -\omega LI.$$

On démontre que la valeur de L est donnée par la relation :

$$(1) \qquad L = l\left(2\,\mu\,\mathrm{Log}_e\frac{d}{r} + \frac{\mu'}{2}\right)$$

dans laquelle l est la longueur totale, aller et retour, des conducteurs ;

μ la perméabilité magnétique du milieu les séparant ;

μ' celle du métal qui les constitue : pour le cuivre, on a sensiblement $\mu' = 1$;

d leur distance *axiale* ;

r leur rayon.

Par unité de longueur, et pour des conducteurs en cuivre, on aura donc :

$$(2) \qquad L = 2\,\mu\,\mathrm{Log}_e\frac{d}{r} + \frac{1}{2}$$

Résistance apparente ; facteur d'impédance. — 248. Si le circuit considéré n'est le siège d'aucune autre

force électromotrice que celle e_s ci-dessus, on aura comme expression de sa résistance apparente ou impédance $\mathfrak{R}$ (§ 43) :

$$\mathfrak{R} = \sqrt{R_a^2 + \omega^2 L^2}$$
$$= R_a \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R_a}} = K_a R.$$

Le facteur $\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R_a^2}} = K$ par lequel il faut multiplier la résistance ohmique du circuit pour obtenir sa résistance apparente, se nomme *facteur* ou coefficient *d'impédance* (§ 43).

En général, dans l'expression (2) de L, μ n'est pas connu *a priori*. Sa valeur varie avec les conditions d'établissement de la canalisation : on cherche à réaliser celles-ci de manière à avoir $\mu = 1$. Remplaçant dans l'expression du facteur d'impédance L par sa valeur, R_a par $kR_c = k\frac{\rho}{\pi r^2}$ par unité de longueur, on obtient :

$$K = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 r^4 \omega^2}{k^2 \rho^2}\left(2 \operatorname{Log}_e \frac{d}{r} + \frac{1}{2}\right)^2}$$

Causes contribuant à accroître la self-induction des circuits. — 249. Le coefficient de self-induction L mesure, pour une intensité de courant égale à l'unité, le flux à travers la section limitée par les axes des deux conducteurs. La valeur de ce flux dépend tout d'abord de la perméabilité du milieu qu'il traverse, milieu comprenant l'espace, de perméabilité μ, qui sépare les conducteurs, plus le métal constituant ceux-ci. Dans le cas général, la perméabilité de cette dernière partie du circuit magnétique total aurait une certaine valeur μ' (relation 1);

pour les conducteurs en cuivre, $\mu' = 1$, et la perméabilité du milieu intermédiaire est seule variable.

La présence de fer dans le voisinage des câbles peut notablement accroître la valeur de μ, et par suite celle de la résistance apparente du circuit ; en particulier, les câbles protégés par une armature en feuillard d'acier donneront lieu à une perte de charge généralement très supérieure à celle que produirait leur résistance ohmique seule, et ceci doit exclure leur emploi, toutes les fois que les deux câbles doivent êtres indépendants, et disposés parallèlement l'un à l'autre. Pour fixer les idées sur l'ordre de grandeur de cette action, voici les résultats d'essais comparatifs que nous avons eu l'occasion de faire sur deux échantillons de câbles identiques, à cela près que l'un était simplement sous plomb, tandis que l'autre comportait une armature.

Deux longueurs égales (200^m), de câbles de même section ($10\ ^m/_{m^2}$), constituaient deux circuits distincts comprenant en outre une résistance ohmique permettant de réduire à 10 ampères l'intensité du courant dans chacun d'eux, pour une force électromotrice de 115 volts aux bornes. On les avait attachés ensemble, de manière à former une même boucle avec les deux circuits limitant ainsi des sections très sensiblement égales.

La perte de charge ohmique obtenue en alimentant l'un et l'autre circuit avec du courant continu fut, pour tous les deux, trouvée égale à environ 4 volts ; avec du courant alternatif, elle fut encore de 4 volts pour le câble sous plomb, et d'environ 15 volts, soit presque quadruplée, pour le câble muni d'un feuillard d'acier.

Dans les canalisations souterraines, le proche voisinage des conduites en fonte disposées parallèlement aux conducteurs, les supports métalliques rapprochés, etc., etc., peuvent produire des effets analogues, et donner lieu à des pertes de charge tout à fait hors de proportion avec

celle prévue à l'origine. Lorsqu'il s'agit de canalisation aériennes, le milieu ambiant étant l'air, $\mu = 1$, et le coefficient de self-induction se réduit alors à la valeur :

$$L = 2 \operatorname{Log}_e \frac{d}{r} + \frac{1}{2}$$

Influence de l'écartement des conducteurs. — 250. En second lieu, le flux ci-dessus dépend de l'étendue du champ limité par les conducteurs, et par suite, pour une longueur de canalisation donnée — soit, par exemple, par unité de longueur — de leur distance d. Il sera évidemment d'autant plus grand que les conducteurs seront plus écartés; c'est d'ailleurs ce que montre la relation (1), dans laquelle le terme $2 \mu \operatorname{Log}_e \frac{d}{r}$ représente la valeur du flux dans l'espace intermédiaire compris entre les câbles. Mais son accroissement en fonction de d devient de plus en plus lent au fur et à mesure que la distance augmente, de telle sorte que le flux peut être considéré comme à peu près constant dès que celle-ci a été rendue suffisamment grande.

Il est facile de se rendre compte de ce fait. Quelle que soit la distance des conducteurs, une partie seulement des lignes de force vient se fermer dans la surface limitée par leurs axes : en les écartant, on augmentera donc indéfiniment le nombre de lignes de force comprises dans l'espace qui les sépare. Mais comme, d'autre part, la densité de celles-ci autour de chaque conducteur décroît indéfiniment au fur et à mesure que l'on s'en éloigne, il en résulte que le supplément de flux gagné en augmentant l'écart, diminue lui-même progressivement jusqu'à devenir pratiquement négligeable lorsque la distance est assez grande.

Dans les conditions ordinaires de la pratique, on est loin d'atteindre cette limite ; l'écartement des câbles

varie en général entre l'épaisseur des isolants, s'ils sont au contact, et un maximum d'environ 50 centimètres, et le flux augmente dès lors rapidement avec la distance d. Ainsi, pour une fréquence de 100 périodes par seconde et des conducteurs de 1 centimètre de diamètre, le calcul de K montre que la résistance apparente, égale à seulement 1,14 fois la résistance ohmique lorsque les câbles sont supposés au contact direct, devient le double de cette dernière dès que l'écart des câbles atteint 10 centimètres, et le triple pour $d = 50$ centimètres.

Diamètre des conducteurs; fréquence du courant. — 251. Enfin, l'expression du coeficient d'impédance

$$K = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 r^4 \omega^2}{\rho^2} \left(2 \operatorname{Log}_e \frac{d}{r} + \frac{1}{2}\right)^2}$$

montre que sa valeur numérique croît rapidement avec le diamètre des conducteurs et avec la fréquence du courant.

Pour $r = 1$, $d = 10$ et une fréquence de 40 périodes par seconde, on trouve :

$$K = 2,57$$

pour 50 périodes :

$$K = 3,12$$

pour 100 périodes :

$$K = 6$$

Pour cette dernière fréquence, $d = 10$ et $r = 0,5$ on a :

$$K = 2,14$$

et pour un rayon double, la valeur précédemment donnée :

$$K = 6$$

252. En résumé, le facteur d'impédance d'un circuit croît avec :

1° La fréquence du courant ;

2° Le diamètre des conducteurs ;

3° Leur distance ;

4° La perméabilité du milieu qui les sépare.

Les exemples numériques qui précèdent montrent que l'accroissement de résistance dû aux actions inductives est loin d'être négligeable : aussi le rayon d'action des canalisations secondaires débitant de grandes intensités sous de faibles tensions est-il beaucoup plus restreint que celui d'une distribution par courant continu. Ainsi que nous venons de le voir, les effets signalés sont complètement indépendants de la valeur de la tension aux bornes ; par contre, leur importance croît rapidement avec l'intensité du courant, c'est-à-dire avec le diamètre du conducteur.

253. Mais il ne faut pas perdre de vue que la perte de charge occasionnée par ces actions, ou, plus exactement, la différence de potentiel qu'elles produisent entre les deux extrémités de la ligne, n'a pas la même importance pratique qu'une perte de charge ohmique numériquement égale.

En premier lieu, nous savons que, seule, la résistance ohmique R_a intervient comme facteur de la perte d'énergie par effet-Joule. Il peut toutefois arriver qu'il existe, à proximité des conducteurs, des pièces métalliques dans lesquelles le flux périodique engendrera des courants de Foucault, d'où un supplément d'énergie perdue sous forme de chaleur ; mais on pourra le plus souvent

disposer la canalisation de manière à éviter toute proximité de ce genre.

De plus, la différence de potentiel restant disponible à l'extrémité du réseau, ou plus généralement aux bornes des récepteurs, n'est pas, comme dans le cas des courants continus, égale à la différence arithmétique entre la tension à l'origine et la perte de charge apparente en ligne, mais seulement à leur différence géométrique différant

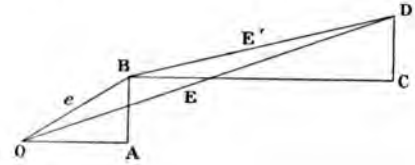

Fig. 107.

d'autant plus de la première que l'importance des actions inductives est plus grande comparativement à la résistance ohmique.

Soient en effet R la résistance ohmique du réseau ; L son coefficient de self-induction ; r et l les constantes analogues pour l'ensemble des récepteurs supposés branchés à l'extrémité de la ligne. Menons (fig. 107) OA = RI, AB = ω LI, BC = rI et CD = ωlI : la ligne de fermeture OD représentera la tension E à l'origine du réseau ; OB, la perte de charge e en ligne, et BD la force électromotrice E′ disponible aux bornes des récepteurs. On a donc :

$$E' > E - e.$$

254. Il est d'ailleurs possible d'annuler, ou tout au moins de restreindre beaucoup l'importance des actions de champ, en amenant les conducteurs au contact, dans le cas où ceux-ci sont isolés, de manière à restreindre au minimum la section ouverte au flux.

L'emploi de câbles concentriques conduit sensiblement

au même résultat ; mais leur prix élevé les fait en général réserver au cas des hautes tensions, pour lesquelles un fort isolement s'impose. La capacité statique de ce genre de conducteur donne d'autre part lieu à des phénomènes spéciaux que nous allons rapidement passer en revue.

Câbles concentriques. — 255. Le câble central et le câble extérieur constituent les armatures d'un condensateur en dérivation sur la différence de potentiel aux bornes de la machine.

1° Il en résulte tout d'abord que le circuit sera le siège d'un courant d'intensité :

$$i_c = \omega CV \quad (\S\ 63)$$

présentant sur la force électromotrice aux bornes une avance de phase égale à 90°, alors même qu'aucun récepteur ne serait en fonction sur la ligne.

Dans les conditions de débit normal, l'intensité i_c se retranchera arithmétiquement de la composante déwattée i_s résultant de la self-induction des récepteurs ; comme cette dernière est, en général, supérieure à i_c, la capacité des câbles aura pour effet de réduire l'intensité déwattée, et par suite d'accroître le facteur de puissance.

2° *Différence de potentiel entre la terre et l'un et l'autre conducteur.* — 256. L'expérience démontre que la différence de potentiel entre la terre et le conducteur extérieur est sensiblement nulle, quelle que soit la valeur de l'isolement.

Il en résulte que, des deux conducteurs qui relient les bornes de la machine aux câbles concentriques, ou ceux-ci aux bornes primaires d'un transformateur, un seul est à un potentiel élevé par rapport au sol. Le danger se trouve de la sorte localisé sur ce conducteur, et l'on peut mettre

à profit cette circonstance en intercalant sur l'autre tous les appareils de mesure : ampèremètres, compteurs ou wattmètres, dont les prises de courant sont en général accessibles. C'est également sur ce câble qu'il conviendra de prendre le contact pour effectuer en marche les mesures d'isolement relatives à l'ensemble du réseau, alternateurs et transformateurs compris.

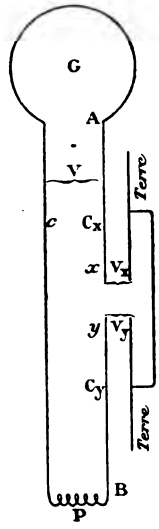

Fig. 108.

3° *Coupure du circuit en un point du câble extérieur.* — 257. Si, le câble central restant relié à la génératrice, on interrompt le circuit en un point quelconque du câble extérieur, la différence de potentiel entre les deux conducteurs pourra dépasser de beaucoup la valeur limite en prévision de laquelle l'isolement a été calculé.

Le schéma (fig. 108) montre en effet que cette différence de potentiel est, dans ces conditions, celle qui apparaîtra entre les armatures extrêmes C_x et C_y des deux condensateurs constitués, l'un par le câble extérieur du tronçon Ax et la terre, le second par la terre et le câble extérieur du tronçon By.

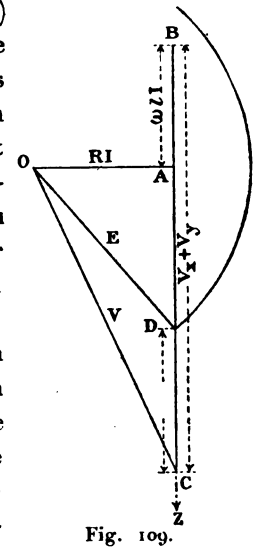

Fig. 109.

Ces condensateurs se trouvent en série dans un circuit comprenant en outre deux self-inductions : celle de l'induit G de la génératrice, et celle de l'ensemble P des primaires de transformateurs ; les forces électromotrices en présence dans le circuit seront donc V_x, V_y et les forces électromotrices de self-

induction en G et P, avec, comme résultante, la force électromotrice induite E de l'alternateur.

On se trouve dès lors dans les conditions signalées au paragraphe 79. Soient I l'intensité dans le circuit, R sa résistance ohmique totale, L et l les coefficients de self-induction de G et de P. Menons (fig. 109), OA = RI, AB = ωlI, et décrivons une circonférence du point O comme centre avec E comme rayon. La direction commune aux deux forces électromotrices V_x et V_y sera BZ, à 180° de AB : soit D le point d'intersection de cette droite avec la circonférence ; portons à partir de ce point la longueur DC égale à ωLI. On obtient de la sorte le diagramme des forces électromotrices en circuit, savoir ;

$$OA = RI,$$
$$AC = \omega l I,$$
$$BC = V_x + V_y,$$
$$CD = \omega LI.$$

La ligne de fermeture OD sera donc le vecteur de la force électromotrice E, et le vecteur OC, somme géométrique de RI, ωLI et $V_x + V_y$, représentera la différence de potentiel totale V entre les deux conducteurs c et C_x (fig. 108). La tension aux bornes x, y de la coupure sera $V_x + V_y$ = BC.

On voit que V peut ainsi atteindre des valeurs très élevées, variant dans le même sens que la capacité des câbles qui limite l'intensité I.

Les interrupteurs devront, en conséquence, être établis de telle sorte que le conducteur central *soit toujours coupé le premier, et remis le dernier en circuit ;* cette prescription est strictement obligatoire partout où l'on emploie des câbles concentriques. En outre, on ne devra jamais *intercaler de plombs fusibles, ou de coupe-circuits quelconques, sur le conducteur extérieur.*

D'ailleurs, les brusques variations dans l'état de charge des conducteurs peuvent présenter des dangers pour leur isolement, et le mieux sera de les éviter dans la mesure du possible.

4° *Effet Ferranti.* — 258. Enfin, la capacité des consducteurs et la self-induction des récepteurs peuvent donner lieu à des phénomènes de résonance produisant, dans certains cas particuliers, des élévations de potentiel sur la ligne.

Ce dernier fait constitue le principal inconvénient des câbles concentriques ; il ne paraît toutefois pas être de nature à faire condamner leur emploi, car la pratique démontre que les accidents susceptibles d'être attribués à cette cause sont très rares.

Pertes d'énergie dans les canalisations. — 259. Indépendamment des pertes par effet-Joule dont l'importance se trouve accrue par suite du phénomène signalé au début de ce chapitre, il existe d'autres causes de dissipation d'énergie ayant leurs origines dans les modifications apportées au milieu ambiant par le champ d'intensité périodique qui existe autour des conducteurs.

En premier lieu, il convient de citer l'échauffement des masses métalliques par suite des courants de Foucault, dans le cas général, et de l'hystérésis dans le cas du fer.

Ces deux actions sont complètement éliminées par l'emploi des câbles concentriques ; par contre, l'hystérésis diélectrique intervient dans ce dernier cas pour occasionner des pertes de même ordre, dont l'importance peut n'être pas négligeable si la canalisation est très étendue ; il n'existe d'ailleurs pas, à notre connaissance, de données numériques précises sur l'ordre de grandeur de ce dernier phénomène.

Modes de distribution des courants alternatifs.

— 260. En France, les règlements interdisent de livrer directement au consommateur les courants à haute tension ; les seuls récepteurs en dérivation sur la ligne primaire seront donc sans exception des transformateurs.

Ces appareils peuvent être groupés dans des sous-stations, alimentant les canalisations secondaires sur lesquelles seront pris les branchements des abonnés, ou encore être installés chez ceux-ci dans des locaux fermés dont l'accès demeure exclusivement réservé aux agents du secteur.

Le choix de l'une ou de l'autre de ces solutions est déterminé par l'ensemble des conditions spéciales à chaque cas particulier, et il est impossible de formuler *a priori* une règle générale.

261. On peut revendiquer en faveur de la distribution par sous-stations la possibilité, évidemment précieuse, de ne maintenir en service que le nombre de transformateurs strictement nécessaire pour satisfaire à la demande de courant sur la ligne. Dans le cas de la transformation chez chaque abonné, la nécessité de maintenir en circuit la totalité des transformateurs, quel que soit leur état de charge, occasionne une dépense d'énergie qui est très loin d'être négligeable. En effet, un transformateur fonctionnant à vide consomme au moins 2,5 p. 100 de l'énergie correspondant à sa charge maxima, et l'importance relative de la perte totale est notablement accrue de ce fait qu'elle est en principe indépendante de la puissance effectivement utilisée dans le réseau, ou produite à l'usine, et ne dépend que de la puissance nominale de l'ensemble des transformateurs. Or cette dernière est en général bien supérieure à la puissance mise en jeu, même au moment du maximum d'éclairage ; ceci résulte d'abord de ce que chaque transformateur doit forcément être prévu pour alimenter la totalité des lampes de l'abonné, alors qu'il est assez rare que celui-ci les utilise

toutes au même instant ; en outre, le moment du maximum de consommation n'est pas le même chez tous les abonnés.

On peut admettre comme utilisation moyenne que, sur 100 lampes installées, 60 seulement seront en fonction à la fois, et que la consommation annuelle équivaudra à celle de ces 60 lampes pendant trois heures par jour. Mais le transformateur ayant été établi pour 100 lampes et restant en circuit pendant vingt-quatre heures par jour, si la consommation payée est représentée par le nombre :

$$60 \times 3 = 180$$

les pertes le seront par :

$$100 \times 24 \times 0{,}025 = 60$$

d'où, comme consommation effective :

$$180 + 60 = 240$$

et comme rendement :

$$\frac{180}{240} = 0{,}75.$$

On perd donc de ce fait 25 p. 100 de l'énergie produite à l'usine ; en pratique, il arrivera fréquemment que la perte dépasse ce chiffre.

Prenons encore le cas d'une exploitation comportant 100 000 lampes de 50 watts. La puissance totale des transformateurs sera de 5 000 kilowatts, et leur consommation à vide :

$$5000 \times 0{,}025 = 125 \text{ kw.}$$

ce qui correspond à une puissance motrice voisine de

200 chevaux uniquement employée à chauffer les locaux renfermant les transformateurs. Si l'on ajoute à cela l'inconvénient d'une mauvaise utilisation du matériel moteur aux heures de faible charge par suite du déwattage occasionné par le courant magnétisant ($\cos \varphi = 0,6$ à $0,7$), on voit que ce mode de distribution est loin d'être à l'abri de toute critique.

262. Il n'en reste pas moins le seul pratiquement réalisable dans certains cas. Malgré les avantages théoriques que présente la distribution par sous-stations, l'application n'en sera possible que si les abonnés se trouvent répartis en groupes suffisamment denses, et de faible rayon, autour d'un très petit nombre de centres ; or, le principal avantage des courants alternatifs est précisément de permettre de distribuer l'énergie en un nombre quelconque de points très écartés les uns des autres, tout en assurant l'uniformité des tensions : et si la condition ci-dessus est remplie, il pourra y avoir lieu de préférer les courants continus qui, pour un même poids de cuivre et à intensité égale, donneront lieu à des pertes de charge beaucoup moindres, tout en se prêtant à des applications plus variées ; on serait dès lors amené à adjoindre aux transformateurs des commutatrices.

Si, par contre, ce mode de distribution conduit, soit à établir de longues canalisations secondaires, soit à multiplier le nombre des sous-stations, l'économie de son emploi pourra être négative. Dans le premier cas, l'importance des pertes de charge par actions inductives exclura la possibilité de maintenir une tension constante et uniforme en tous les points du réseau, à moins que l'on ne consente un poids de cuivre hors de proportion avec la somme d'énergie distribuée ; dans le second, les frais d'exploitation se trouveront grevés du fait de l'accroissement de personnel nécessaire à la surveillance

des sous-stations, et des frais de location d'immeubles pour celles-ci.

Il pourra y avoir intérêt, dans le cas général, à combiner les deux solutions, en réservant l'emploi des sous-stations aux quartiers où la consommation est très dense.

Déwattage du courant ; moyens théoriques d'y remédier. — 263. Nous avons, au cours des études précédentes, signalé les conséquences du déwattage en ligne (§ 56, 57, 84, 193, etc.). On peut les résumer comme suit :

1° Dans le circuit secondaire, l'effet du décalage du courant est de diminuer pour une puissance donnée, la force électromotrice utilisable aux bornes des récepteurs, par suite du supplément de perte de charge qu'occasionne dans le réseau la majoration de l'intensité, et surtout par suite de la chute de tension dans le transformateur (§ 200).

2° Au point de vue de la génération dans l'usine centrale, le plus grave inconvénient du déwattage est d'entraîner une mauvaise utilisation du matériel moteur, par suite de ce fait que la limite de charge, imposée par l'échauffement de l'induit, est atteinte pour l'alternateur avant de l'être pour la machine motrice (§ 107), tout au moins dans le cas, à peu près général, où les puissances nominales de ces deux machines sont les mêmes.

Ainsi, pour un facteur de puissance égal à 0,7, la puissance effectivement produite ne représentera que les 7/10 de la puissance nominale correspondant au matériel immobilisé ; de telle sorte que l'on sera le plus souvent amené à maintenir en fonction un nombre d'unités génératrices plus grand qu'il ne le serait si, à puissance égale, le courant était totalement watté.

Par exemple, si la puissance individuelle des unités génératrices est de 100 kilowatts, la limite de charge,

dans les conditions ci-dessus, sera atteinte pour l'une d'elles aussitôt qu'elle débitera le courant correspondant seulement à 70 kilowatts. Il faudra donc, pour un chiffre un peu supérieur, soit 75 kilowatts par exemple, lui adjoindre une deuxième unité, chacune d'elles fonctionnant dès lors dans des conditions de charge représentant les $\frac{37,5}{100}$ de sa puissance nominale.

Indépendamment des frais supplémentaires de graissage, de surveillance et d'entretien, qu'occasionne un pareil état de choses, il conduit en outre à un abaissement du rendement global de l'ensemble. En effet, d'une part, les pertes correspondant au fonctionnement à vide de chaque alternateur sont alors exactement le double de ce qu'elles devraient être, puisqu'il y a deux alternateurs en fonction au lieu d'un seul; d'autre part, les machines motrices fonctionnant l'une et l'autre sous des charges inférieures à 50 p. 100 de leur puissance, se trouvent de ce fait dans de mauvaises conditions au point de vue du rendement.

264. La suppression du déwattage présenterait donc un intérêt de premier ordre. On ne peut d'ailleurs pas songer à combattre directement les causes qui le produisent, car elles sont presque toutes la conséquence forcée des conditions de fonctionnement des appareils de transformation ou d'utilisation. On peut même dire qu'elles font partie intégrante de ces conditions.

En effet, abstraction faite de la self-induction du réseau toujours relativement faible, nous trouvons comme éléments de déwattage sur le circuit secondaire :

1° En première ligne, les moteurs asynchrones dont l'emploi tend de plus en plus à se répandre. Leur facteur de puissance reste en général inférieur à 0,6, et descend fréquemment à 0,5 dans les conditions de faible charge.

2° Les bobines de self-induction et les bobines-série des lampes à arc.

D'après la remarque faite au paragraphe 206, le décalage entre le courant secondaire et la force électromotrice aux bornes de l'induit du transformateur se reproduira intégralement entre la force électromotrice et le courant primaire, lorsque le transformateur sera normalement chargé.

Dans les conditions de faible charge, le déwattage au primaire sera majoré du fait de l'intensité magnétisante, présentant, comme nous l'avons vu, un retard de phase de 90° sur la force électromotrice primaire, et dont l'importance relative n'est pratiquement négligeable que dans le voisinage de la pleine charge.

Si l'on considère en outre que le fonctionnement des moteurs asynchrones aura lieu dans presque tous les cas pendant le jour, c'est-à-dire aux heures de faible charge, on voit que les deux causes ci-dessus de déwattage au primaire se produiront simultanément, de telle sorte que le matériel générateur de l'usine centrale se trouvera pendant les heures de jour dans des conditions d'utilisation et de rendement tout à fait défectueuses.

265. Mais si l'on ne peut, de toute évidence, songer à annuler la self-induction des moteurs, non plus que celle des primaires de transformateurs, il est par contre possible d'en combattre les effets immédiats, qui consistent en l'introduction d'une composante déwattée dans le courant total; il suffira en principe pour cela d'établir en dérivation sur le réseau un ou plusieurs récepteurs susceptibles de produire une avance de phase du courant; la nouvelle composante déwattée ainsi introduite se retranchant, comme nous l'avons vu, de la première, il en résultera un décalage nul si leurs valeurs respectives sont égales.

Nous connaissons actuellement deux moyens pouvant théoriquement conduire à ce résultat : ils consistent dans

l'emploi, soit d'un condensateur, soit d'un moteur synchrone surexcité, tous deux en dérivation sur la ligne.

Soient φ l'angle du décalage du courant, I son intensité totale, V la différence de potentiel aux bornes du réseau. L'intensité déwattée ayant pour valeur :

$$i_d = I \sin \varphi$$

celle de la capacité en dérivation devra être :

$$C = \frac{I \sin \varphi}{\omega V}.$$

Si l'on emploie un moteur synchrone, son induit devra être calculé pour supporter une intensité égale à la somme géométrique de i_d et de l'intensité wattée i_w correspondant à la puissance dépassée des actions parasites.

266. Malgré les avantages que présenterait la première solution de n'exiger en principe, ni surveillance, ni entretien, et de ne donner lieu à aucune complication pour la mise en fonction de l'appareil, elle n'a pu jusqu'à présent être appliquée, faute de condensateurs industriels.

Le moteur synchrone reste donc le seul appareil dont on puisse disposer pratiquement pour effectuer le rewattage du courant.

Comme son action ne se fera sentir que dans la partie du circuit comprise entre ses bornes et celles de la génératrice, il y aurait de ce fait intérêt à l'établir le plus loin possible de celle-ci. Par contre, le réglage rationnel de l'excitation, laquelle doit varier avec l'importance à chaque instant du courant déwatté sur la ligne, exige que l'on connaisse l'intensité totale, afin de pouvoir manœuvrer de manière à la rendre constamment minima. Il y aura donc à ce point de vue intérêt à établir le moteur synchrone à l'origine même du réseau secondaire, c'est-

à-dire aux bornes du transformateur. La composante déwattée subsistera, il est vrai, dans le réseau secondaire, mais on aura de la sorte neutralisé les effets tout au moins les plus nuisibles du décalage, consistant en les chutes de tension qu'il occasionne dans les génératrices primaire et secondaire, et en la mauvaise utilisation de celles-ci, surtout pour ce qui concerne la première.

Signalons, en terminant, ce fait que, malgré les avantages que paraît présenter à ce point de vue le moteur synchrone et bien que son emploi ait été préconisé depuis longtemps, par M. Blondel notamment, ce genre spécial d'application ne semble pas s'être, jusqu'à ce jour, beaucoup répandu.

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

CHAPITRE PREMIER. — **Notions générales** 1

Génération du courant ; sa variation en fonction du temps : loi sinusoïdale. — Rapports de phase : décalage. — Valeurs efficaces : représentation graphique des fonctions sinusoïdales ; vecteurs : calcul graphique. — Lois générales.

CHAPITRE II. — **Circuits de courants alternatifs**. 34

Polarité instantanée des conducteurs ; phénomènes généraux. — Effets de la self-induction : résistance apparente, facteur d'impédance ; décalage du courant : ses effets. — Circuits dérivés ; composition des intensités ; impédance réduite de *n* dérivations. — Capacité ; condensateurs. — Courant dans un circuit comprenant un condensateur ; résistance apparente du circuit ; décalage du courant. — Condensateur en dérivation aux bornes d'un réseau ; effet de la composante déwattée ; relation entre la capacité et la self du réseau pour un décalage nul. — Condensateur en série sur une self.

CHAPITRE III. — **Conditions de fonctionnement d'un alternateur considéré isolément**. . . . . .

Force électromotrice induite ; fréquence ; transformation du travail mécanique en énergie électrique. — Détermination du flux effectif ; réaction d'induit ; influence du décalage. — Force électromotrice à circuit ouvert ; résistance apparente de l'induit ; sa détermination expérimentale : méthode de M. Behn Eschenburg. — Variation de 74

réluctance du circuit magnétique en fonction du décalage. — Caractéristique à circuit fermé sur une résistance ohmique. — Puissances respectives de l'alternateur et de son moteur. — Courts-circuits.

CHAPITRE IV. — **Conditions de fonctionnement des alternateurs en parallèle** 107

Synchronisation de deux alternateurs fermés en court-circuit l'un sur l'autre sans dérivation extérieure. — Cas général : diagramme du couplage en parallèle : intensités des courants et puissances respectives des alternateurs pour des excitations données ; cas où la puissance motrice est constante. — Courant de circulation ; condition pour qu'un des alternateurs fonctionne en réceptrice. — Stabilité de marche : action synchronisante du courant de circulation. — Détermination pratique des éléments du diagramme. — Conduite de la marche en parallèle : couplage et découplage des alternateurs. — Cas d'un nombre quelconque d'alternateurs en parallèle ; conditions de stabilité de l'un d'eux considéré à part. — Influence des variations périodiques du couple moteur, et en général de l'ensemble des conditions motrices. — Procédés usuels de mise en parallèle.

CHAPITRE V. — **Transformateurs** 170

Flux effectif dans le circuit magné tique ; composition des flux générateurs et de réaction. — Forces électromotrices : force électromotrice induite dans une spire ; disponible aux bornes du secondaire ; différence de potentiel aux bornes du primaire. — Principes généraux du fonctionnement : transformation de l'énergie ; intensité du courant primaire : courant magnétisant. — Rapport de transformation. — Variation de l'intensité primaire en fonction de l'intensité secondaire ; effets du décalage au secondaire. — Dispersion magnétique ; détermination expérimentale des forces électromotrices de self-induction dans les deux bobinages : chute de tension dans le transformateur en fonction de l'intensité et du calage du courant secondaire. — Hystérésis et courants de Foucault. — Conditions pratiques du fonctionnement ; son mécanisme.

CHAPITRE VI. — **Moteurs à courants alternatifs** 203

Différents types de moteurs alternatifs. — Moteurs syn-

chrones ; puissance en fonction du décalage ; stabilité de marche ; influence du taux d'excitation : intensité minima pour une puissance donnée ; effets de la surexcitation. — Mise en marche. — Moteurs-dynamos. — Moteurs d'induction : principes généraux de leur fonctionnement ; champ tournant ; expression du couple moteur en fonction du glissement ; décomposition d'un champ alternatif simple en deux champs tournants ; application aux moteurs monophasés. — Constitution du moteur ; procédés usuels de démarrage ; réversibilité des machines asynchrones. — Convertisseurs de courant alternatif en continu ; commutatrice. — Principe général ; intensité du courant dans l'induit ; influence des pertes ; décalage. — Panchahuteur Hutin et Leblanc.

CHAPITRE VII. — **Distribution des courants alternatifs**. . . 235

Résistance ohmique des conducteurs aux courants alternatifs. — Self-induction des circuits : résistance apparente, facteur d'impédance. — Causes contribuant à accroître la self-induction des circuits : influence de la constitution du milieu ambiant, de l'écartement des conducteurs et de leur diamètre, de la fréquence du courant. — Perte de charge en ligne et tension utilisable à l'extrémité. — Câbles concentriques ; capacité ; répartition des potentiels ; coupure du circuit sur le câble extérieur ; effet Ferranti. Pertes d'énergie dans les canalisations. — Modes de distribution des courants alternatifs : transformateurs isolés ; sous-stations. — Pertes résultant du fonctionnement en permanence de l'ensemble des transformateurs. — Déwattage du courant ; moyens théoriques d'y remédier ; condensateur et moteur synchrone.

TABLE ALPHABÉTIQUE

A

Alternateurs . . . . . 5, 74.
— (conditions de fonctionnement des). . . . 74 à 106
— (en parallèle). . . . . 107 à 169
Alternatifs (courants) 1
Ampèremètres 18
Angle de décalage. 10
Appareils de mesure 18
Apparente (résistance). Voir *Impédance*. 42
Applications de la méthode de Behn-Eschenburg. . . . 94 à 99
Asynchrones (moteurs). . . . . 212 à 225
Avance de phase 11
— d'un alternateur au couplage 143
— du courant dans un moteur synchrone 208
— dans un circuit comprenant un condensateur 61

B

Behn-Eschenburg (méthode de). 90
Blondel 22, 117, 128, 143, 256
Bobines de self-induction. 49

C

Câbles armés. 240
— concentriques 39, 245
Calage (angle de). 10
Calcul des valeurs efficaces. 16
Capacité 38, 59, 245

Caractéristiques 87, 99
Champ tournant 214, 217
Chute de tension dans l'induit d'un alternateur 85
— — dans un transformateur 189
Circuits de courants alternatifs . . . . . 34 à 73
— dérivés 31, 53
Coefficient de self-induction 47, 87, 100, 189
— de deux conducteurs parallèles 238
Commutatrices 227
Condensateurs . . . . . 59 à 73-255
— dans un circuit sans self 60
— en dérivation 62
— en série sur une self 67, 73
Conduite de la marche en parallèle 132
Convertisseurs 227
Couplage des alternateurs 135
Couple moteur 151
— dans un moteur asynchrone 219
Coupure sur le câble concentrique 246
Courants alternatifs 1
— d'excitation 6, 80, 101
— watté et déwatté 33
— de Foucault 36, 195
— de circulation 124
— synchronisant 128
— magnétisant 178
Courroies (commande par) 164
Courts-circuits 105

D

Décalage 10
— du courant dans un circuit comprenant une self, 43, 50
— du courant dans un circuit comprenant un condensateur 61
— du courant dans un circuit comprenant une self et un condensateur 67
— du courant dans l'induit d'un alternateur 82
— du courant dans un transformateur 182, 193
— du courant dans un moteur synchrone 207
— de deux alternateurs 112
Décomposition d'un flux alternatif simple 218
Découplage d'un alternateur 139
Démarrage des moteurs 221
Dérivations 53
— magnétiques 171, 184

Déwattage 33, 252
Diagramme de la marche en parallèle 117
Diamètre des conducteurs 235, 242
Diélectrique (hystérésis) 39, 248
Différence de phase 10
Différence de potentiel aux bornes d'un condensateur . . 59, 73
— — aux bornes des récepteurs 244
— — entre les points de coupure d'un câble concentrique 247
Dispersion magnétique 184, 189
Distribution des courants alternatifs . . . . . 235 à 256
Dynamo-série 204, 212

E

Écartement des conducteurs 240
Effectives (valeurs) 30, 31
Efficaces (valeurs) . . . . . 14 à 23
Électro-dynamomètre 19
Électro-magnétiques (appareils) 19
Elliptique (champ tournant) 227
Excitation 5
— d'un alternateur 101
— des alternateurs en parallèle 122
— influence sur le calage 148

F

Facteur d'impédance 43, 61, 238
— de puissance 32
Flux efficace 22
— effectif 31
— inducteur 78, 81, 82
— magnétisant 171
Force électromotrice alternative 8
— — efficace 14
— — maxima 8, 17
— — résultante 24
— — effective 29
— — génératrice 29
— — de réaction 30
— — de self-induction 40
— — effective dans un circuit comprenant une self 41
— — effective dans un circuit comprenant un condensateur 60

Force électromotrice effective dans un circuit comprenant une self-induction et un condensateur 66
— — effective aux bornes d'un condensateur 60
— — — induite dans un alternateur. 75, 80
— — — circuit ouvert 85, 91
— — aux bornes de l'induit 86
— — induite dans un transformateur 173
— — aux bornes du secondaire. 173
— — aux bornes du primaire 174
— — de self-induction dans les bobinages des transformateurs. 188
— — aux bornes des récepteurs. 244
Foucault (courants de). 36, 195, 248
Fourier (série de). 7
Fréquence 9, 76, 242

G

Ganz (méthode de) 138, 141
Génération des courants alternatifs 1
— de l'énergie électrique. 4
Génératrices. . . . . 1 à 5
— asynchrones 225
Glissement 215

H

Hut'n et Leblanc 234
Hystérésis 37, 195
— diélectrique 39, 248

I

Impédance 42, 55, 61, 86, 88, 238
— réduite. 55
— d'un alternateur. 86
Induction mutuelle. 37
Intensité de courant 8
— efficace. 14
— wattée et déwattée. 32
— résultante 25, 31
— des courants débités par deux alternateurs couplés 119, 124
— des courants dans un transformateur . . . 178, 180, 181
— minima dans un alternateur au couplage 140
— minima dans un moteur synchrone 207
— dans une commutatrice 231

J

Joule (effet) 49

K

Kapp 188
Kelvin 130

L

Lampes de phase 164
Leblanc 218, 226, 234
Lois générales 29
— des variations périodiques 7

M

Magnétique (dispersion) 184
Magnétisant (courant) 6, 178, 197
Maxima (valeurs) 17
Mesure des valeurs efficaces 18
Méthode de Ganz 138, 141
— de Kapp 185
— stroboscopique 160
Mise au couplage des alternateurs 135
Mise en marche des moteurs synchrones 210
Modes de distribution 248
Moteurs . . . . . 203 à 225
— synchrones . . . . . 205 à 212
— dynamo 212
— d'induction . . . . . 213 à 225
Motrices (conditions) 157

N

Notions générales . . . . . 1 à 33

O

Oscillographes 7, 21

P

Panchahuteur Hutin et Leblanc 234
Parallèle (marche en) . . . . . 107 à 169
Période 8

Perméabilité du milieu entourant les conducteurs 239
Pertes de charge en ligne 244
— d'énergie dans un réseau 248
— par hystérésis 37
— par courants de Foucault 37
Phase 10
Phénomènes généraux 35
Pionchon. 22
Pôles relatifs 34
Position relative des masses polaires 88
Primaire (force électromotrice) 173, 174, 186
— intensité. 178, 181
— canalisation 249
Procédés de couplage 164
Puissance. 25, 32, 44, 62, 104, 120
— facteur de 33
— synchronisante 112
— transformée. 182
— respectivement développée par deux alternateurs couplés. 120

R

Rapport de transformation. 180
Réaction (force électromotrice de). 30
— d'induit . . . . . 73 à 84
Réglage de la tension 103
— des excitations d'alternateurs en parallèle . . . 122, 134
Régulateurs de vitesse. 123, 159
Remèdes au déwattage. 252
Répartition du potentiel sur un câble concentrique 245
Résistance apparente (voir *Impédance*) . . . . . .
— ohmique des conducteurs 235
Retard de phase. 10
— dans un circuit comprenant une self. 43
— de phase d'un alternateur au couplage 143
Réversibilité des moteurs asynchrones. 225
Rhéostat de charge 138, 141

S

Secondaire (force électromotrice induite au) 173, 186
— (intensité) 181
— canalisation. 249
Self-induction. 35, 40, 237
— effets de la self-induction. 45

Self-induction (coefficient de) 47
— d'un alternateur 85
— d'un transformateur 188
Série de Fourier 7
Sinusoïdale (loi) 7, 47
Sommes de forces électromotrices 24
— d'intensités 25
Sous-stations 249
Stabilité d'un alternateur 128, 142
— d'un moteur synchrone 206
Stroboscopique (phénomène) 160
Surexcitation des moteurs synchrones 208
Synchrones (moteurs) 203, 205, 255
Synchronisant (courant) 128
Synchronisateur 164
Synchronisation 109

T

Tension (réglage de la) 103
Thermiques (appareils) 18
Transformateurs . . . . . 5, 170 à 202
— chez les abonnés 249
— rotatifs 227
Transformation du travail mécanique en énergie électrique 4, 76
— de l'énergie électrique 5, 177
— (rapport de) 180
Travail des courants alternatifs 32

U

Utilisation du courant 51
— d'un alternateur 105
— des génératrices 52

V

Valeurs efficaces 14
— effectives 30, 31
— maxima 17
Variations périodiques 1
— — du flux inducteur 81, 82
— — du couple moteur 151
Variations de charge 169
— de l'intensité primaire dans un transformateur 181, 182

Vecteurs 26
Vérification expérimentale 46
Voltmètres 20
— de phase 164

W

Wattée (intensité) 32
Wattmètres 130

MAY 3 1921

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

7606